

VŠB – Technická univerzita Ostrava

Fakulta stavební

Katedra geotechniky a podzemního stavitelství

Experimentální stanovení únosnosti tmelených svorníků
Experimental Bearing Capacity Determination of Bonded
Rock Bolts

Student:

Jaroslav Holíš

Vedoucí diplomové práce:

doc. Ing. Karel Vojtasík, CSc.

Ostrava 2014

Zadání diplomové práce

Student: **Bc. Jaroslav Holíš**
Studijní program: N3607 Stavební inženýrství
Studijní obor: 3607T035 Geotechnika
Téma: **Experimentální stanovení únosnosti tmelených svorníků**
Experimental Bearing Capacity Determination of Bonded Rock Bolts

Zásady pro vypracování:

Úvod

Analýza činnosti tmelených svorníků

Návrh zkoušky pro experimentální stanovení pracovní charakteristiky tmeleného svorníku

Provedení experimentálních zkoušek

Vyhodnocení zkoušek

Závěr

Seznam doporučené odborné literatury:

Zajíc, Josef.; Hobst, Leo.: *Kotvení do hornin*. Praha : SNTL, 1975.

Sborníky mezinárodních kolloquií *Ankerbau im Bergbau / Roofbolting in Mining* Aachen, Germany;

Institute of mining engineering I - RWTH Aachen University

Formální náležitosti a rozsah diplomové práce stanoví pokyny pro vypracování zveřejněné na webových stránkách fakulty.

Vedoucí diplomové práce: **doc. Ing. Karel Vojtasík, CSc.**

Datum zadání: 28.02.2014

Datum odevzdání: 01.12.2014



doc. RNDr. Eva Hruběšová, Ph.D.
vedoucí katedry



prof. Ing. Radim Čajka, CSc.
děkan fakulty

Prohlášení studenta

Prohlašuji, že jsem celou diplomovou práci včetně příloh vypracoval samostatně pod vedením vedoucího diplomové práce a uvedl jsem všechny použité podklady a literaturu.

V Ostravě dne 1. 12. 2014

.....

Jméno a příjmení studenta

Prohlášení studenta

Prohlašuji, že

- byl jsem seznámen s tím, že na moji diplomovou práci se plně vztahuje zákon č. 121/2000 Sb. – autorský zákon, zejména § 35 – užití díla v rámci občanských a náboženských obřadů, v rámci školních představení a užití díla školního a § 60 – školní dílo.
- беру на вѣдомі, že Vysoká škola báňská – Technická univerzita Ostrava (dále jen VŠB-TUO) má právo nevýdělečně ke své vnitřní potřebě diplomovou práci užít (§ 35 odst. 3).
- souhlasím s tím, že jeden výtisk diplomové práce bude uložen v Ústřední knihovně VŠB-TUO k prezenčnímu nahlédnutí. Souhlasím s tím, že údaje o diplomové práci budou zveřejněny v informačním systému VŠB-TUO.
- bylo sjednáno, že s VŠB-TUO, v případě zájmu z její strany, uzavřu licenční smlouvu s oprávněním užít dílo v rozsahu § 12 odst. 4 autorského zákona.
- bylo sjednáno, že užít své dílo – diplomovou práci nebo poskytnout licenci k jejímu využití mohu jen se souhlasem VŠB-TUO, která je oprávněna v takovém případě ode mne požadovat přiměřený příspěvek na úhradu nákladů, které byly VŠB-TUO na vytvoření díla vynaloženy (až do jejich skutečné výše).
- беру на вѣдомі, že odevzdáním své práce souhlasím se zveřejněním své práce podle zákona č. 111/1998 Sb., o vysokých školách a o změně a doplnění dalších zákonů (zákon o vysokých školách), ve znění pozdějších předpisů, bez ohledu na výsledek její obhajoby.

V Ostravě dne 1. 12. 2014

.....

Jméno a příjmení studenta

J. Kavky 3112, Frýdek - Místek
.....

Adresa trvalého pobytu studenta

Anotace:

Diplomová práce se zabývá únosností tmelených horninových svorníků a jejím experimentální stanovením. Tato práce analyzuje a poukazuje na možné způsoby porušení, které vznikají zatížením v těsné blízkosti svorníkové tyče a to především v prstenci tmele na kontaktech svorník – tmel a tmel – hornina. V teoretické části byl navržen způsob měření a stanovení pevnostních a deformačních charakteristik tahem zatížených tmelených svorníků napodobujících zatížení v kořenové délce svorníkové výztuže. V praktické části byly pak navržené postupy uskutečněny sérií laboratorních zkoušek. Výstupem z provedených zkoušek je pracovní-deformační charakteristika tmelené svorníkové výztuže zvoleného testovaného materiálu.

Klíčová slova: horninový svorník, únosnost horninových svorníků, laboratorní zkouška svorníkové výztuže, tmelené svorníky

Annotation:

The thesis focuses on the bearing capacity of bonded rock bolts and experimental determination of this capacity. Possible ways of failure, which is caused by the load near the rock bolt, especially in the circular ring of the grout and between the rock bolt - the grout and between the grout - the rock, are analysed. The theoretical part includes design of measuring and assessment of strength and deformation characteristics on drawn rock bolts as it simulates the load in the root length of bolt reinforcement. This theory was applied in the laboratory tests and presents the practical part of the thesis. In conclusion, the load - deformation characteristics of bonded rock bolt reinforcement made from chosen material are stated.

Key words: rock bolt, bearing capacity of rock bolt, laboratory test of rock bolt, bonded rock bolt

Vzor citace:

HOLIŠ, J.: *Experimentální stanovení únosnosti tmelených svorníků*, Ostrava, VŠB - TU Ostrava, 2014, 44 s.

Poděkování,

především bych chtěl poděkovat mému vedoucímu diplomové práce panu doc. Ing. Karlovi Vojtasíkovi za vedení diplomové práce, odborné konzultace a připomínky. Dále pak odbornému konzultantovi z praxe panu Ing. Romanu Markovi, Ph. D. za cenné rady, připomínky a poskytnutý materiál jakožto zástupce firmy Minova Bohemia, panu Ing. Janu Hurtovi za velmi ceněnou pomoc v laboratořích stavebních hmot fakulty stavební VŠB-TUO a panu Ing. Markovi Mohylovi.

Obsah

| | |
|---|-----------|
| SEZNAM POUŽITÉHO ZNAČENÍ | 8 |
| 1 ÚVOD..... | 9 |
| 2 ROZDĚLENÍ SVORNÍKOVÉ VÝZTUŽE PODLE RŮZNÝCH ASPEKTŮ | 10 |
| 3 ANALÝZA ČINNOSTI TMELENÝCH SVORNÍKŮ | 12 |
| 4 NÁVRH ZKOUŠKY PRO EXPERIMENTÁLNÍ STANOVENÍ PRACOVNÍ CHARAKTERISTIKY TMELENÉHO SVORNÍKU | 15 |
| 5 PROVEDENÍ EXPERIMENTÁLNÍCH ZKOUŠEK | 18 |
| 5.1 PŘÍPRAVA ZKUŠEBNÍCH TĚLES | 18 |
| 5.2 PROVEDENÍ MĚŘENÍ | 23 |
| 6 VYHODNOCENÍ EXPERIMENTÁLNÍCH ZKOUŠEK | 26 |
| 6.1 VYHODNOCENÍ VYBRANÉ TAHOVÉ ZKOUŠKY CKT SVORNÍKU | 32 |
| 6.2 POROVNÁNÍ S OBDOBNOU ANALÝZOU | 39 |
| 7 ZÁVĚR | 40 |
| 8 SEZNAM GRAFICKÝCH ČÁSTÍ..... | 42 |
| 8.1 OBRÁZKY | 42 |
| 8.2 GRAFY..... | 42 |
| 8.3 TABULKY | 43 |
| 9 SEZNAM POUŽITÝCH PRAMENŮ | 44 |

Seznam použitého značení

| Značení a příslušná veličina | | Jednotka |
|------------------------------|------------------------------|----------------|
| D | průměr vývrtu | m |
| E | Youngův modul pružnosti | MPa |
| F | síla | kN |
| L | délka kotvené části svorníku | m |
| S | plocha | m ² |
| d | průměr svorníkové tyče | m |
| l | volná délka svorníku | m |
| Δ | deformace | mm |
| σ | napětí | MPa |
| ε | poměrné přetvoření | - |

1 Úvod

V hornické praxi, podzemním stavitelství či pozemním inženýrství je často zapotřebí zajistit nestabilní horninové okolí stavby. Tohoto stabilizování lze dosáhnout pasivním nebo aktivním vyztužováním. Pasivní způsob zahrnuje metody, jejichž schopnost odporu vůči vznikajícímu zatížení je podmíněna pohybem horninového masivu. Patří zde například klasická dřevěná výdřeva, ocelová oblouková výztuž, plošná betonová a železobetonová výztuž a další. Naproti tomu aktivní metody vyztužování využívají vnitřního chování horninového masivu a mění ho ve prospěch stability. Hlavním předpokladem aktivních metod je umístění nosných prvků v podobě různých tyčových elementů uvnitř samotného masivu. Tyto elementy následně umožňují využití vzdálenějších neovlivněných oblastí masivu, případně vyztužením a předpětím mohou zpevnit oblast v těsném okolí výrubu, což umožňuje hornině samotné přenést určité zatížení. [V]

V moderní praxi 20. století se technologie svorníkování nejprve uplatnila při hornické činnosti. Nicméně k jejímu prvnímu užití došlo podstatně dříve a to už u primitivních kmenů z oblasti dnešní Indie, které vylepšovaly únosnost zeminy tím, že do ní zatloukali dřevěné tyče, což je nejzřetelnější příklad toho, že zemina dokáže přenést značné zatížení sama za předpokladu, že jsou pro ní vytvořené vhodné podmínky. [VII]

Pro podmínky hornické činnosti se nejprve vyvíjí mechanicky kotvené prvky, jejichž největší výhodou je rychlost zabudování a za nejvýraznější slabou stránku lze považovat omezenější únosnost. Jako příklad lze uvést svorníky kotvené bodově pomocí klínu, nebo šroubovou hlavou, dále pak svorníky třecí kotvené plošně, kam se řadí šterbinové a modernější hydraulicky rozpínané svorníky. S rostoucími nároky na technologii svorníkování a současně s ohledem na bezpečnost při důlní činnosti se posléze vyvíjí přibližně od 50. let 20. století svorníky tmelené. Tyto svorníky využívají k upnutí směsi na bázi cementu případně modernější alternativy pryskyřice. [VIII]

Výše bylo zmíněno technologické dělení především po stránce upnutí. Tato práce se bude zabývat úzkou skupinou tmelených svorníků a to se zaměřením na ocelové, lepenými hydraulickými směsmi, při čemž bude kladen důraz na experimentální stanovení jejich únosnosti a případné mechanismy jejich aktivace.

2 Rozdělení svorníkové výztuže podle různých aspektů

Mimo dělení podle způsobu kotvení, zmíněné v úvodu, lze technologii svorníkování rozdělit například z hlediska délky, kdy můžeme prvky rozdělit na krátké kotvy tzv. svorníky a dlouhé kotvy. Svorníky jako tyčové tahové prvky, obvykle délky okolo 5 m, bývají upnuty různými způsoby a pro jejich včasnou aktivaci bývají většinou předepnuty, nejčastěji dotažením matice v hlavě svorníku. Jejich schopnost přenášet zatížení je přibližně do 100 kN. Dlouhé kotvy, nejčastěji pramencové či kabelové, jsou delší než svorníky a kotví se kořenem, následně se taktéž předpínají. Jejich únosnost je vyšší. Hlavní rozdíl, oproti svorníkům, spočívá především v možnosti přenesení zatěžujících sil hlouběji do masivu okolo vznikajícího díla. Jako třetí typ kotvicích těles mohou být uvedeny hřebíky, které jsou obdobné délky jako svorníky, nicméně nejsou předpínány a upnuty jsou po celé své délce. Z těchto důvodů jsou vhodnější pro přenášení přímého stříhu a využívají se spíše v zeminách. [IX]

Vyztužovací prvky lze rozdělit také z pohledu použitých materiálů a to jak pro samotné tělo svorníků, tak pro kotvicí směsi (pro případ tmelených svorníků). Dřevo je jeden z prvních materiálů, který se na výrobu svorníků použil. Pro dnešní podzemní stavitelství již není vhodné především kvůli jeho nízkým pevnostním parametrům, ale najde se několik případů, ve kterých je nízká pevnost ku prospěchu. Například pro zajištění slojí a pilířů při hornické činnosti, kdy lze tyto prvky poměrně snadno rozrušit dobývacími kombajny bez následků na použitá díla. Vývojově druhým materiálem byla ocel, která v různých podobách umožňuje mechanické ukotvení nebo lepené. Vlastnosti oceli a její pořizovací náklady (poměr cena/výkon) ji v současnosti předurčují k nejpoužívanějším materiálům. Vývojově nejmladšími jsou kompozity tvořené syntetickými materiály a skelnými vlákny. Sklolaminátové kotevní tyče jsou vyráběny tažením z průběžných skelných vláken navzájem spojených polyesterovou pryskyřicí. Spojením těchto materiálů se dosahuje vysoké pevnosti v tahu, nízké hmotnosti, snadné odstranitelnosti, nižší stříhové pevnosti, ohebnosti a dobrých antikoročních vlastností. Tyto kombinace vlastností zaručují, že se dají takovéto prvky rychleji aplikovat (snadnější manipulace) a sklolaminátové tyče není problematické dodatečně odstranit při postupu dalších těžebních prací. Jedná se o spojení výhod předchozích dvou materiálů. Hlavním záporným rysem kompozitních materiálů je pořizovací cena, avšak tento rozdíl se v současnosti pomalu vytrácí díky masové výrobě těchto materiálů. Pro účely lepení se pro tyto materiály využívají například hydraulické směsi či polyuretanové pryskyřice. [VII][VIII][IX]

Volený typ technologie je závislý od mnoha požadavků na ni, jako je rychlost zavedení, cena nebo provázanost s již zavedenými technologiemi a odvíjí se od ní další důležitá kritéria, jako je způsob zavedení svorníků a rychlost náběhu plné únosnosti, která se může lišit právě v důsledku zvolených materiálů. U všech zmíněných druhů svorníků je prvním předpokladem provedení vývrtu, do kterého může být svorník umístěn. Tento vývrt může být proveden samostatnou vrtací technikou a až následně probíhá zabudování výztuže (jedná se o původní způsob zabudování), nebo prostřednictvím vrtání uzpůsobené svorníkové tyče opatřené ztracenou vrtnou korunkou, která po vyvrtání otvoru zůstává již nevyužita jako součást výztuže. Takovéto systémy se nazývají samozavrtávací, anglicky označované jako SDA (Self Drilling Anchor). SDA prvky jsou výhradně tmeleny, což umožňuje již ve výrobě vytvořená dutina v těle svorníku, kterou je možné injektážní směs zavést do vývrtu. Samozavrtávající svorníky umožňují spojit práce do jednoho aplikačního kroku, což značně zkracuje čas na zabudování výztuže, ale současně i zvyšuje finanční náročnost technologie (zvýšené výrobní náklady na svorníky vybavené dutinou a vrtnou korunkou na jedno použití). Nejvýhodnější z hlediska rychlosti náběhu únosnosti jsou nesporně mechanicky kotvené prvky, u nichž je okamžitá únosnost hned po zabudování. Avšak v současnosti stírá možnost okamžité únosnosti vytvoření směsi tmele podle požadavků projektanta. U směsí na bázi polyuretanových pryskyřic může směs nabývat plné únosnosti v řádu několika desítek minut, v případě hydraulických pojiv nastává zpevnění v řádu několika hodin a plná návrhová pevnost je uvažována standardně až po 28 dnech. [VI][VIII]

Poslední rozdělení, které bude uvedeno, je podle využití svorníkové výztuže s jinými konstrukčními prvky. Svorníky lze použít samostatně, kdy mohou působit jednotlivě (například pouze pro zavěšení technologií) nebo skupinově, kdy zpevňují horninový masiv a zabraňují nežádoucím projevům. V podmínkách, kdy hrozí vznik jakékoliv seismické aktivity, je využití samostatné svorníkové výztuže omezeno, a proto je vhodné ji použít společně s výztuží podpěrnou jako tzv. výztuž kombinovanou. Za takovýchto okolností pomáhá svorníková výztuž zvládnout zatížení, kterým by podpěrná výztuž nebyla schopna odolávat (respektive podpěrná výztuž pomáhá svorníkové) a využití je ze statických důvodů. Také existuje možnost kombinace z technologických důvodů, kdy je třeba dobré statické vlastnosti svorníkové výztuže podpořit vodotěsností pomocí jiného systému. [V]

3 Analýza činnosti tmelených svorníků

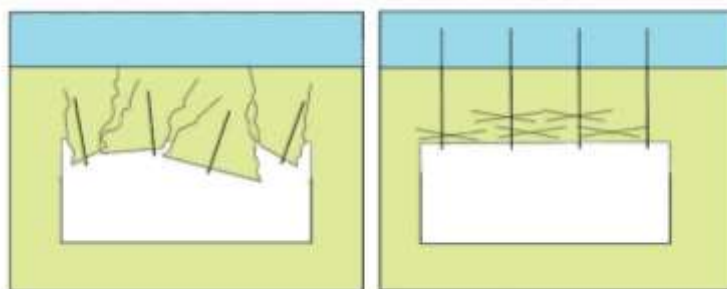
Spojení mezi svorníkem a okolním materiálem, kterým bývá skalní masiv, může být tvořeno cementovou směsí, nebo lepidlem na bázi pryskyřice. V souvislosti s použitými materiály jsou voleny též průměry vrtaných otvorů. Tloušťka vrstvy lepidel a tmelů se pohybuje v rozmezí 3 až 8 mm, u cementových zálivek může být tato vrstva silnější. Tato velikost vrstvy mezikruží použitého tmele je stanovena převážně empiricky na základě zkušeností v daných podmínkách. Svorník je pak zatížen plášťovým třením postupně přenášeným na kontaktech hornina – tmel a tmel – svorník. Výsledná síla se dále odvíjí od délky upnutí prostřednictvím tmele a je pak dále přenášena tělem svorníku. Všechny zmíněné prvky a kontakty ovlivňují výsledné maximální zatížení svorníkové výztuže. V závislostech na mechanických vlastnostech konkrétního tmele a svorníku dochází k poruše vyztužující soustavy a to buď na kontaktu svorník - tmel, tmel - hornina nebo k porušení samotného svorníku (tahem či stříhem). Jako poslední způsob porušení lze ještě uvést vytržení či porušení svorníku i z části samotného horninového okolí. Při dnešních kvalitách injektážních směsí je porucha na kontaktu lepidla a masivu pravděpodobnější, než porucha na kontaktu svorníku a tmele. Díky znalosti možných porušení lze jako kritické parametry uvést body z následujícího přehledu. [X]

Vnitřní únosnost je závislá na vlastnostech jako:

- Vlastnosti kotevního prvku:
 - Materiál – pracovní-deformační charakteristika kotevního prvku, pevnostní vlastnosti, čas (degenerace)
 - Geometrie – průřezová plocha, geometrie závitů (velikost a rozmístění závitů)
- Vlastnostmi tmele:
 - Materiál – pevnostní a deformační vlastnosti, čas (tuhnutí, degenerace)
 - Geometrie – množství, rozmístění a kvalita vyplnění mezi kotevním prvkem a okolím
- Vlastnosti okolní horniny:
 - Velikost vývrtu
 - Drsnost povrchu vývrtu
 - Tlak působící na stěny vývrtu
 - Pevnost a deformační vlastnosti horniny

- Chování horniny v čase (přeskupování napětí v závislosti na postupu ražby)
- Další vlivy plynoucí z okolní horniny (přítomnost vody a její chemické složení, teplota, ...)

Všechny tyto vlivy a možnosti porušení jsou zaměřeny na poškození prvků svorníkové výztuže v těsném okolí aplikace, avšak ve skutečnosti může docházet k vzájemnému působení vícero faktorů a následně může dojít ke zkolabování celé výstužné soustavy vlivem nedostatečného pochopení systému jako celku a z něj plynoucího nevhodného návrhu. Příklad špatného návrhu lze vidět na Obr. 1, kde lze vidět v levé části obrázku, že nedochází k dostatečnému zpevnění horniny v okolí výrubu a ani k přenosu zatížení do únosnější vrstvy, čehož je docíleno v druhém případě znázorněném vpravo. To znamená, že při navrhování svorníkové výztuže musí být brány v potaz i vlastnosti a stav masivu v okolí aplikace, nikoliv jen použitého materiálu. Tato práce se bude zabývat chováním především použitých materiálů.



Obr. 1 Příklad vhodného a nevhodného zajištění profilu díla

Jak je patrné, tak navrhování svorníkové výztuže je velice komplexní záležitostí. Z těchto důvodů bylo vyvinuto mnoho metod navrhování výztuže. Ty jsou často specifické pro konkrétní podmínky aplikace, proto se projekty svorníkové výztuže nenavrhují podle jednotného vzoru prostřednictvím normou daných výpočtů, ale naopak se postupy silně přizpůsobují podmínkám prostředí. Případné nařízení a normy pak spíše stanovují minimální délky a maximální dovolené rozestupy svorníkové výztuže nebo jiná omezení vzhledem k použité výztuži a metodě návrhu. Pro navrhování svorníkové výztuže se z důvodů složitého pochopení problematiky s postupem času vyvíjí různé metodiky navrhování, mezi které se řadí analytické metody, empirické metody, počítačové modelování a observační metody. Tato diplomová práce vychází aspoň okrajově ze všech zmíněných metodik krom počítačového modelování. [VII]

Pro potřeby pozdějšího zpracování dat bude probrána možnost porušení soudržnosti na kontaktu hornina – tmel a tmel – svorník. Únosnost na těchto rozhraních je závislostí geometrie

(plocha kontaktu, drsnost povrchu) a pevnostních charakteristikách (pevnost horniny, tmele). Maximální mezní síla může být nejjednodušeji analyticky vyjádřena vztahy [IX]:

$$F = S_1 \tau = \pi \cdot d \cdot L \cdot \tau \quad [1]$$

$$F = S_2 \cdot \tau = \pi \cdot D \cdot L \cdot \tau \quad [2]$$

kde τ je smyková pevnost (soudržnost) na vyšetřované ploše porušení a je ovlivněna adhezí (minimální vliv), spřažením a třením stýkajících se materiálů. Soudržnost je tedy daná druhem kontaktu (hornina – tmel či tmel – svorník). Plocha S je odvozena od geometrických rozměrů jako průměr svorníkové tyče d (respektive vývrtu D) a délkou ukotvené části L . Výsledné mezní zatížení bývá pak v praxi zmenšeno bezpečnostní konstantou, která nabývá hodnot cca 1,3 až 1,8, a síla působící na svorník by neměla překročit tuto hodnotu. Tento vztah však předpokládá současné porušení v celé kotvící délce, což nemusí být pravda. Cílem této práce je pokusit se stanovit, jestli k usmýknutí po celé ploše S dochází skutečně v totožný čas, či nikoliv. Pokud nedochází tak případně popsat blíže tento proces.

Příklad observační metody k ověření chování svorníkové výztuže se používají mimo jiné tahové zkoušky svorníků in situ či v laboratořích, které stanovují především maximální zatížení před porušením a probíhající deformace při postupném zatěžování. Tyto zkoušky by se měly v terénu provádět v krátkém časovém intervalu po instalaci, který je omezen minimálním časem pro vytvrzení použitého tmele na požadovanou pevnost a probíhajícími deformacemi v horninovém masivu, které by mohly testovaný svorník atypicky sevřít a zkreslit tak měření. V případě laboratorních zkoušek, využitých i v této práci, je vzniklé omezení způsobeno pouze tuhnutím aplikovaného tmele. Zatěžování během takovýchto zkoušek by mělo probíhat pomalu, rovnoměrně a kontinuálně. Výsledná analýza tahové zkoušky je dána vztahem:

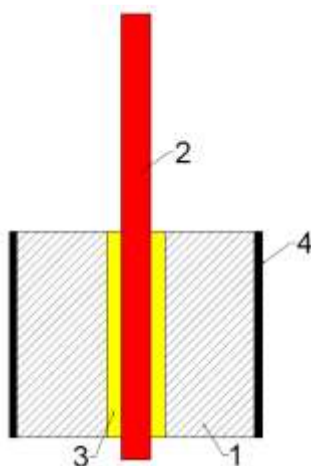
$$\Delta = F \cdot l / (E \cdot \pi \cdot d / 4) \quad [3] \quad [VII]$$

kde F je plynule se navyšující zatížení, l volná délka svorníku, E Youngův modul pružnosti svorníkové tyče a d průměr jádra svorníkové tyče. Delta je výsledné prodloužení volné části svorníkové tyče. Tento vztah vychází z Hookova zákona. Zaznamená-li se průběh zkoušky v závislosti na síle (respektive napětí), může se následně porovnat s průběhem deformace ekvivalentní svorníkové tyče, kterou udává vztah [3], přičemž rozdíl deformací při totožné síle určuje posun ukotvené části svorníkové výztuže. S obdobným postupem bude pracováno v dalších částech diplomové práce.

4 Návrh zkoušky pro experimentální stanovení pracovní charakteristiky tmeleného svorníku

Návrh zkoušky pro experimentální stanovení pracovní charakteristiky tmelených svorníků vychází z předchozí kapitoly 3. Za účelem vytvoření podmínek blízkých horninovému prostředí bude využito betonového tělesa různých velikostí (jeho konkrétní vlastnosti budou uvedeny v další kapitole). Pro minimalizaci vlivů bude toto těleso zvoleno co nejtuzší, s optimálním rozložením napětí díky kruhového průřezu a různých délek (pro ověření vlivu tohoto parametru na měření). Pro docílení ještě vyššího ztužení a zpevnění, zvýšení bezpečnosti, snížení rizik poškození laboratorní techniky a usnadnění manipulace s případným silně porušeným vzorkem bude toto těleso umístěno do ocelové objímky, která umožní jeho mírné sevření.

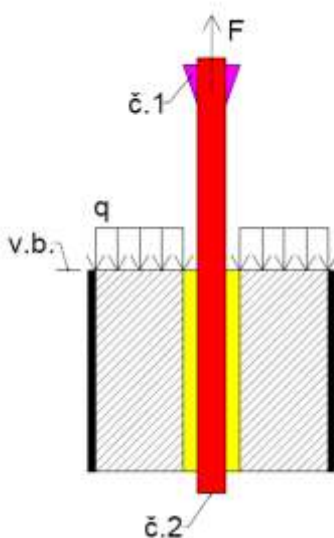
Po vytvoření zkušebních těles do nich bude následně vyvrtán otvor vhodného průměru. Pro vrtání bude využita diamantová vrtná korunka průběžně chlazená vodou, což vytvoří obdobné podmínky jako při osazování svorníků v praxi. Oproti postupům za skutečných podmínek nebude využito rotačního vrtání s příklepem a to z důvodů přesnosti vývrtů pro účely měření, omezení zbytečného porušení připravených zkušebních těles a s ohledem na zvýšení opotřebení vrtné korunky. Takto připravené zkušební těleso bude následně osazeno vhodným svorníkem připnutým tmelem (viz. Obr. 2).



Obr. 2 Schéma navrhovaného vzorku: 1- Betonové těleso; 2- Svorník; 3- Tmel; 4- Objímka

Zatěžovací síla na takto připraveném tělese bude vyvozována na volné délce svorníku a adekvátní reakce bude vznikat na vrchní ploše betonové části vzorku. Deformace a výsledné posuny svorníku budou během zatěžování snímány ve dvou bodech celé soustavy. První pohyb bude snímán v místě přichycení volného konce tyče na zkušebním lisu a tento posun bude

snímat samotný lis s tím, že pohyb je měřen zprostředkovaně přes upínací čelisti a jejich nosné lóže. Druhý snímací bod je volen na spodní straně svorníku a to z důvodů snadného přístupu k tomuto místu. Měření v druhém bodě bude probíhat pomocí externího optoelektronického inkrementálního čidla a to bezprostředně na svorníku. Hlavní vztažný bod celé měřicí soustavy bude horní strana betonové části celého vzorku (v tomto místě se bude opírat lis o vzorek prostřednictvím ocelové podložky). Celé schéma navrhovaného zatěžování a měření deformací je uvedeno na Obr. 3.



Obr. 3 Schéma zatěžování a měření na vzorku: F – zatěžovací síla; q – reakce; č. 1. – čidlo 1; č. 2 – čidlo 2; v. b. – vztažný bod

Jak je patrné z Obr. 3, tak větší část naměřených deformací na čidle č. 1 bude způsobená protažením na volné části dříku svorníku (oblast mezi v.b. a č. 1). Tato deformace bude brána v úvahu a bude po provedení zkoušek eliminována dodatečně. K tomuto účelu bude stanovena deformační charakteristika svorníku, která bude následně vhodně aproximována na funkci závislosti deformace na síle pro zvolenou délku dříku. Tato aproximace umožní zpětné zjištění deformací připadající nekotvené části a jejich následné odečtení od naměřených hodnot na čidle č. 1. Protože se dřík svorníku nebude deformovat lineárně v celém intervalu své únosnosti (v závislosti na síle respektive síle na deformaci), bude aproximace ukončena ještě před dosažením meze pružnosti. Díky výše popsanému způsobu eliminace bude stanoveno protažení svorníku, jako by bylo čidlo č. 1 umístěno na svorníku v úrovni vztažného bodu.

Pro možnosti zkoušky budou využity různé materiály svorníků a tmelů. Následné vyhodnocení bude probíhat na nejcharakterističtější zkoušce (především z důvodů snazšího popsání a pochopení procesu porušování vzorku). Použité svorníky a tmely pro zkoušky jsou voleny na základě nejčastějšího použití v praxi a současně poukazují na různorodost materiálů.

Jako hlavní materiál pro kotvení je volen ocelový svorník CKT o průměru 25 mm bez závitů tyče, jako dalšího materiálu bude možno využít sklolaminátové tyče typu ROCKBOLT taktéž průměru 25 mm. Délky těchto tyčí budou přizpůsobeny betonovým tělesům a laboratorní technice. Jako tmel bude využito směsí určených pro injektáž svorníků a to na bázi pryskyřice (rychle reagující, nenapěňující, dvousložková elastifikovaná organickominerální injekční pryskyřice GEOFLEX) nebo směsí na bázi cementu (jedná se o předem namíchanou směs na bázi portlandského cementu EKOMENT RT a směs cementové malty s přídavkem popílku vytvořenou pro účely experimentálních zkoušek). Možné kombinace navrhovaných materiálů jsou uvedeny v Tab. 1. Varianta s cementovou maltou a přídavkem popílku je uvedena jen pro ocel z důvodů předpokladu možnosti opakovaného použití svorníku (snadné očištění kotevní tyče a jistota jejího nepoškození) a současně je brána jako nulová varianta pro odzkoušení postupů měření. Minimálně u primární varianty se uskuteční zkouška pro tři délky betonových těles, u zbylých variant rozhodnou výsledky z první série zkoušek.

Tab. 1 Možné kombinace materiálů pro účely zkoušek

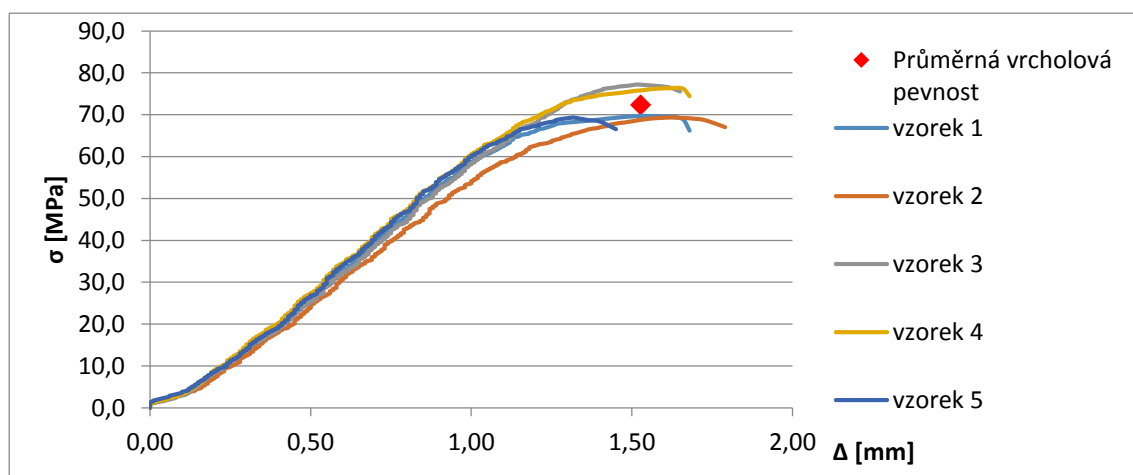
| Materiál svorníků | Materiál tmelů | Poznámka pro danou kombinaci |
|-------------------|-------------------------------------|--------------------------------------|
| Ocel | Cementová malta s přídavkem popílku | kombinace pro ověření postupů měření |
| | Cement | primární kombinace |
| | Pryskyřice | hypotetická kombinace |
| Sklolaminát | Cement | sekundární kombinace |
| | Pryskyřice | |

Pro docílení přesnějších výsledků bude každá zkouška provedena třikrát za identických podmínek (výška betonového vzorku, délka a materiál svorníkové tyče, materiál použitého tmele, rychlost zatěžování vzorků). Pro primární variantu z toho vyplývá provedení devíti experimentálních zkoušek.

5 Provedení experimentálních zkoušek

5.1 Příprava zkušebních těles

Pro napodobení podmínek horninového prostředí byla použita receptura betonu s vyšší pevností, než je obvyklá. Výsledná průměrná pevnost betonu byla po 28 dnech 72,4 MPa. Vlastnosti receptury betonu byly ověřeny celkem v pěti zkouškách na krychlových vzorcích dle normy ČSN EN 12390-3 - *Zkoušení ztvrdlého betonu - Část 3: Pevnost v tlaku zkušebních těles* a jsou zaznamenány v grafu 1. Beton této kvality byl použit z důvodů co největšího omezení vlivů na výsledné měření.



Graf 1 Deformační charakteristika betonu

Tvar vzorku byl volen kruhového průřezu za účelem docílení rovnoměrného rozložení napětí ve vzorku a současně bylo umožněno obepnutí vzorku objímkou. Velikost byla volena s ohledem na možnosti laboratoře a to průměr vzorků 15 cm, výška vzorků 15 cm, 30 cm a 45 cm (různé délky pro možnost ověření lineárního vlivu tohoto parametru na měření). Tyto rozměry byly dány velikostí forem pro standardizovanou zkoušku pevnosti betonu měřenou na válcových vzorcích jmenovitého rozměru 30 cm výška a 15 cm průměr. Výšky vzorků 15 cm bylo dosaženo rozřezáním tělesa o původní výšce 30 cm na polovinu pomocí diamantového segmentového kotouče, pro výšku 45 cm bylo využito nastavení již zmíněné formy pomocí plastové trubky o shodném průměru. Ukázku forem lze vidět na Obr. 4. V další fázi po odformování těles a vytvrzení betonu (minimálně 28 dnů) bylo přistoupeno k odvrtání vzorků. Pro velikost vývrtu byl zvolen jako vhodný průměr 35 mm, který byl zvolen jako adekvátní pro průměr svorníkových tyčí 25 mm na základě interní příručky pro doly *Svorníková výztuž - příručka* [X] v rámci ostravsko-karvinského revíru, přičemž doporučený vnější průměr mezikruží pro svorníky lepené pryskyřicí je dle volené technologie o 3-8 mm větší než průměr svorníkové tyče a pro svorníkování pomocí cementové

malty je doporučena vrstva mezikruží přibližně také 8 mm. Volený průměr diamantové korunky 35 mm tedy splní předpoklad tohoto mezikruží pro cementový tmel a také pro tmel na bázi pryskyřice (vrstva lepící směsi bude přibližně 10 mm), současně bude vhodně napodobovat skutečné podmínky geotechnické praxe. Vzhledem k možnostem techniky laboratoře stavebních hmot bylo zvoleno ruční vrtání pomocí stojanové vrtačky, jenž nebylo schopno zaručit přesně kolmé odvrtání na plochu, na kterou bude vyvozována reakce q (viz. Obr. 3). Tento mírný odklon od vertikální osy není sice optimální, ale pravděpodobně nezpůsobí větší výkyvy v měření. S použitou vrtnou korunkou bylo úspěšně odvrtáno cca 7 m. Použité zařízení a výslednou podobu tělesa lze spatřit na Obr. 5.



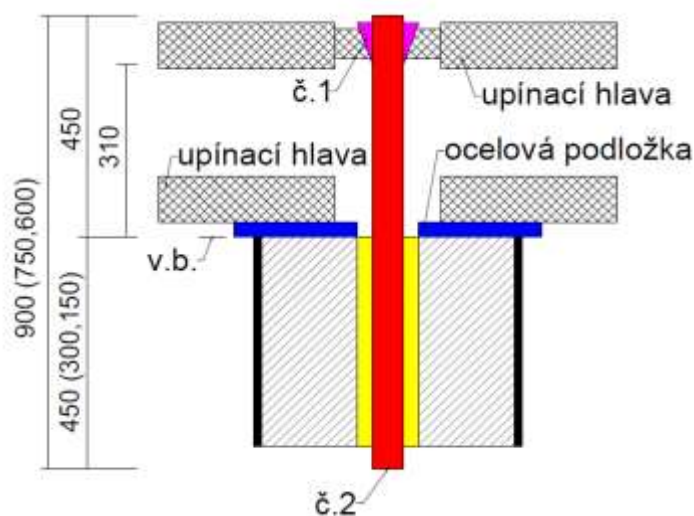
Obr. 4 Formy pro betonáž zkušebních těles



Obr. 5 Vrtací technika a zkušební betonové těleso

Svorníkové tyče CKT a ROCKBOLT byly dodány v délce 1,5 m. Pro účely měření bylo zjištěno, že minimální délka volného konce svorníku na vzorku musí být cca 45 cm. Volná délka musí totiž umožnit prostup ocelovou podložkou tloušťky cca 5 cm, o kterou se bude opírat

betonové těleso a vyvozovat reakci q (viz. Obr. 3), dále musí procházet přes upínací hlavy a v jedné z nich musí být svorník dostatečně zachycen v čelistech lisu (o první upínací hlavu se vzorek pouze opírá prostřednictvím ocelové podložky). Čistě volný dřík, pro který je uvažováno zkreslující protažení, má délku 31 cm a je uvažován jako konstantní, protože je dán měřicí technikou a to minimální vzdáleností upínacích hlav. Výsledné nutné délky svorníku pro betonová tělesa výšek 15 cm, 30 cm a 45 cm byly 60 cm, 75 cm a 90 cm (jdou vyčíst taktéž na Obr. 6 i se zbylými rozměry), což umožňovalo vhodné kombinace řezání dodaných tyčí bez odpadu (kombinace 90 cm + 60 cm a 75 cm + 75 cm). Řezání svorníkových tyčí probíhalo na pásové pile osazené pásem určeným k řezání oceli. Toto řezání bylo průběžně chlazené vodou.



Obr. 6 Schéma pro odvození nutných délek svorníku

V poslední etapě přípravy vzorků se musely svorníkové tyče vlepít do již připravených betonových těles. K tomuto účelu byly vybrány směsi cement EKOMENT RT, malta s příměsí popílku a pryskyřice GEOFLEX.

EKOMENT RT je hydraulická směs na bázi portlandského cementu určená především pro upínání tyčových nebo syntetických kotev a pro aplikaci zavrtávacích systémů. Tato směs obsahuje kromě základní báze speciální cementy, plnivo o maximální velikosti zrna 0,3 mm a speciální plastifikační přísady. Dalšími vlastnostmi směsi jsou jednoduchá zpracovatelnost, žádné sklony k segregaci, nízké smrštění a objemová stálost. Především první dva zmíněné rysy se projeví v přípravě této směsi pro její aplikaci. Jediná možnost ovlivnění přípravy této směsi spočívá ve změně vodního součinitele, který byl volen spíše v jeho krajní vyšší hranici $v/c=0,4$ (doporučený vodní součinitel se pohybuje v intervalu 0,2 až 0,5) a to z důvodů vyšší tekutosti, která umožňovala méně obtížnou manipulaci se směsí. Při nižších hodnotách vodního součinitele okolo 0,2 by měla směs vykazovat tixotropní vlastnosti, které by byly spíše na obtíž.

Na doporučení konzultanta byl zvolen postup částečného vylití vrtu a až následného umístění svorníkové tyče do otvoru. Vzhledem k nízké viskozitě směsi byl tento postup ideální z hlediska manipulace a současně zajišťoval homogenitu tmelového prstence okolo svorníku. Maximální návrhové pevnosti dosahuje EKOMENT RT po 28 dnech, pro účely zkoušky se směs nechala zrát pouhých 7 dní a to z více důvodů. Prvním důvodem bylo dosažení větší shody s hornickou praxí, kde se pro aspoň částečné zatížení svorníků mnohdy nemůže čekat celých 28 dnů. Druhým důvodem bylo urychlení měření, kvůli přístupu do laboratoří stavebních hmot.

Druhá směs malty na bázi popílku byla volena jako referenční směs a současně sloužila pro ověření postupů měření. Hlavním požadavek na tuto směs bylo dosažení nízké pevnosti, který byl zapříčiněn potřebou znovupoužitelností svorníkové tyče a betonového tělesa, pro snížení nákladů zkoušek (hlavně časových). Recepturu malty zvolil pracovník laboratoří stavebních hmot na základě svých zkušeností a její složení je uvedeno níže v Tab. 2. Tato malta se ponechala zrát taktéž sedm dní z obdobných důvodů jako předchozí směs z cementu EKOMENT RT. Jelikož takováto směs není používána pro lepení svorníků při hornické činnosti, tak vykazovala horší vlastnosti pro manipulaci s ní. Směs měla tendence segregovat a vykazovala větší tření při jejím umisťování do vrtu a to patrně z důvodů využití větší frakce zrn písku pro její přípravu než u předchozí směsi, která obsahovala jen plnivo o maximální velikosti 0,3 mm. Především kvůli nízké tekutosti se ukázal předchozí postup vylití vývrtu a následné vsunutí svorníkové tyče jako neefektivní. Postup byl tedy upraven, vývrt byl jen částečně vylit a zbylá hmota tmele se vyplňovala po zasunutí svorníkové tyče ručně pomocí špachtle. Pro docílení lepší homogenity a zhutnění byla směs vystavena menším rázům přes svorníkovou tyč pomocí gumového kladiva.

Tab. 2 Složení malty s příměsí popílku na cca. 1,5 l

| Složky | Cement 32,5 R | Křemičitý písek | Popílek | Voda |
|--------------|---------------|-----------------|---------|------|
| Množství [g] | 150 | 1350 | 100 | 450 |

Pevnosti obou tmelů v tlaku je srovnána v Tab. 3 a byla stanovena na základě normy ČSN EN 1015-11 - Stanovení pevnosti ztvrdlých malt v tahu za ohybu a v tlaku. Pevnost malty v tahu za ohybu se stanovuje tříbodovým zatěžováním do porušení na tělesech o rozměru 40x40x160mm a pevnost v tlaku se zkouší na dvou polovinách trámečku po zkoušce pevnosti v tahu za ohybu. Výsledná pevnost malty s příměsí popílku splnila požadavek na její nízkou pevnost, která činila v průměr 1,05 MPa. Cement EKOMENT RT vykázal naopak vysokou

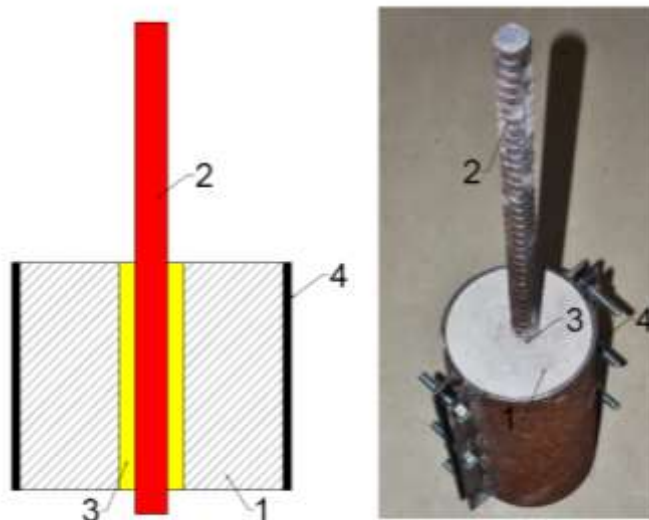
únosnost 57,38 MPa už po sedmi dnech (vykazoval lepší vlastnosti než deklarované v technickém listu produktu), jenž už je srovnatelná s pevností betonových těles (72,4 MPa).

Tab. 3 Pevnost použitých tmelů na bázi cementu po 7 dnech

| Vzorek | | Pevnost 1 | | Pevnost 2 | | Průměrná pevnost |
|-------------------------|---|-----------|-------|-----------|-------|------------------|
| | | [kN] | [MPa] | [kN] | [MPa] | [MPa] |
| malta s příměsí popílku | 1 | 1,7 | 1,10 | 1,8 | 1,16 | 1,05 |
| | 2 | 1,7 | 1,11 | 1,0 | 0,65 | |
| | 3 | 1,8 | 1,18 | 1,7 | 1,12 | |
| EKOMENT RT | 1 | 89,9 | 56,19 | 87,0 | 54,38 | 57,38 |
| | 2 | 93,5 | 58,44 | 94,4 | 59,00 | |
| | 3 | 92,1 | 57,56 | 93,9 | 58,69 | |

Jako poslední varianta materiálu určeného pro lepení svorníků byla volena pryskyřice GEOFLEX. Jedná se o rychle reagující nepěnicí dvousložkovou elastifikovanou injekční pryskyřici s výbornou přilnavostí k hornině a stavebním materiálům. Je určena pro zpevnění horninového masivu, stavebních konstrukcí a pro upínání kotevních prvků lepením. Vzhledem k rychlosti chemické reakce je GEOFLEX klasifikován jako okamžitě únosný, konečné pevnosti nabývá cca po 15 minutách. Poslední zmíněná vlastnost udává možnosti manipulace s tímto materiálem. Musí dojít k rychlému promíchání dvou složek a okamžité aplikaci. Tyto složky musí být promíchány v poměru 1:1 a rozmíchány do konzistentní barvy. I přestože byla směs míchána ve velmi malém množství (cca 0,4 l), nebylo ji možné míchat ručně (směs by zatuhla dříve, než by byla dostatečně homogenní). Jako nejvhodnější nástroj pro účely míchání se ukázal vrtačka s plynulou regulací rychlostí otáčení osazená kuchyňským míchadlem ve tvaru šroubovice. Následná aplikace měla spočívat ve vlití pryskyřice do otvoru již osazeného svorníkem. Tento postup se však neosvědčil, z důvodů rychle se měnící konzistence tmele, a proto bylo přistoupeno k totožnému postupu jako u cementu EKOMENT RT. Nejprve byl vývrt vyliť pryskyřicí a až následně byla vkládána svorníková tyč.

Ocelová objímka se na takto připravené vzorky upínala jako poslední těsně před samotnou tahovou zkouškou. Byla uzpůsobená jednotlivým délkám vzorků. Skládala se ze dvou částí vysokých 15 cm a 30 cm. Pro vzorky s betonovým tělesem výšky 45 cm se použily tyto dvě části současně, což způsobilo vznik diskontinuity ve směru kolmém na svorník. Aby se zamezil vliv této nespojitosti v objímce na měření, byla větší 45 cm část objímky umístěna blíže k upínací hlavě. Uchycení objímky zajišťovaly šrouby s maticemi. Výsledná podoba s popisem a porovnání se schématem z návrhu zkoušky je porovnána na Obr. 7, kde je mimo jiné vidět betonové těleso s výškou 30 cm a adekvátní objímkou.



Obr. 7 Porovnání schématu vzorku se skutečným stavem: 1- Betonové těleso; 2- Svorník; 3- Tmel; 4- Objímka

5.2 Provedení měření

Pro první sérii zkoušek byla vybrána kombinace malty s příměsí popílku a ocelových svorníků. Nejvyšší možné zatížení, které snesou připravené vzorky, udává vždy nejslabší článek a tímto článkem mohla být v extrémním případě samotná svorníková tyč. Z tohoto důvodu mohlo být největší možné zatížení dané únosností svorníkové tyče na mezi pevnosti, která pro ocelový svorník CKT z oceli S670H a průměru 25 mm činí 390 kN a pro sklolaminátový svorník ROCKBOLT taktéž průměru 25 mm nabývá hodnoty 350 kN (případně maximální deklarovaná únosnost kompozitu na závitu upnutém přes matici délky 100 mm je 180 kN). S ohledem na tuto informaci byl volen v laboratořích stavebních hmot lis s maximální zatěžovací silou 400 kN. Jelikož lis, na kterém probíhala zkouška, umožňoval nastavení zatěžovací rychlosti tahové síly, bylo přistoupeno k zatěžování rychlostí 0,4 kN/s. Tato rychlost byla volena z více důvodů. Na základě doporučení pracovníka z praxe měla zkouška proběhnout do cca 15 minut, aby bylo dosaženo obdobné rychlosti jako během zkoušek in situ. Volená rychlost byla také nejmenší možnou volenou pro zkoušky s předpokládanou vyšší únosností (následující zkoušky s tmelem EKOMENT RT) a to z důvodu měnící se rozpoznávací škály rychlostí zatěžování na měřicí technice pro vyšší docílené maximální zatížení (příčinou byl analogový ciferník s proměnným měřítkem dle zatěžovacího rozsahu). Obdobná rychlost (0,5 kN/s) byla také použita při obdobném pokusu prováděném v diplomové práci ing. Alice Hastíkové [XI].

První čidlo bylo dáno konstrukcí samotného lisu a jeho přesnost je v řádu tisícín milimetru, druhé čidlo bylo volené pracovníkem laboratoří stavebních hmot. Byla možnost použití analogového měřidla, které by bylo pro účely zkoušky naprosto nevhodné a to především kvůli podstatně nižší přesnosti než na čidle osazeném v lise a velice obtížné časové synchronizaci naměřených výsledků s hodnotami naměřenými na čidle č. 1. Proto bylo čidlo č. 2 volené jako optoelektronický inkrementální snímač polohy umožňující vyšší přesnost a hlavně s možností propojení se zařízením lisu a okamžitým, časově shodným záznamem s veškerými naměřenými veličinami. Hlavní nevýhodou tohoto snímače je jeho křehkost, která vytvářela větší riziko jeho poškození, přičemž pro snížení tohoto rizika bylo čidlo umístěno na nezávislé konstrukci od konstrukce lisu, která současně bránila možnému přímému pádu betonové části zkušebních těles na optoelektronický snímač. Fotografie celé měřicí soustavy a detailu s čidlem č. 2 můžeme vidět na Obr. 8.

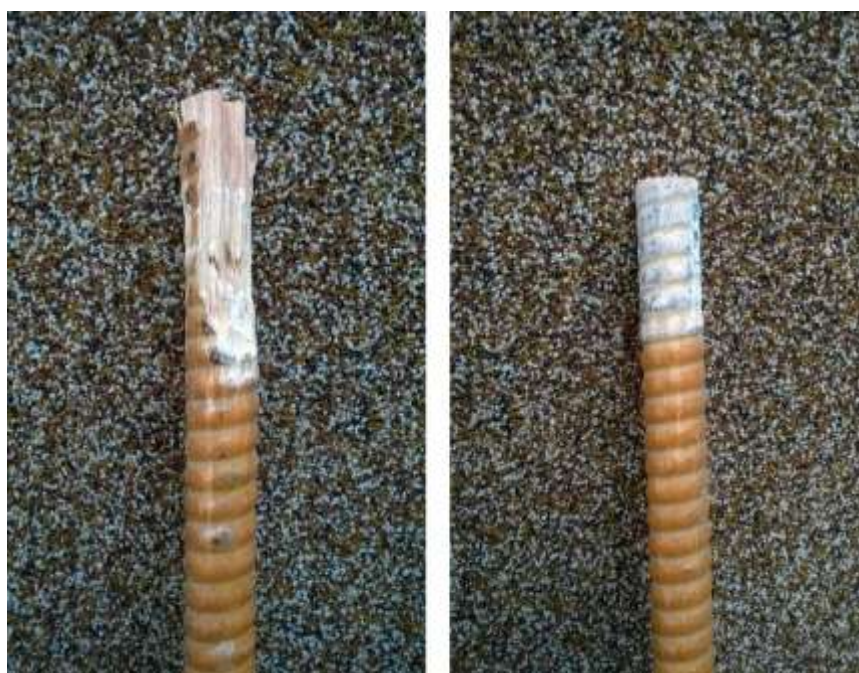


Obr. 8 Měřicí soustava a detail čidla č. 2

V rámci eliminace protažení volné části dřívku svorníku byly provedeny i tahové zkoušky na samostatném svorníku. Tyto zkoušky byly provedeny na základě normy ČSN EN ISO 6892-1:2009 *Kovové materiály – Zkoušení tahem* a současně se uskutečnily na totožném zařízení jako tahové zkoušky na tělesech určených pro experimentální stanovení únosnosti tmelených svorníků.

V rámci experimentálních tahových zkoušek byly nachystány i sklolaminátové svorníkové tyče ROCKBOLT lepené dvousložkovou pryskyřicí GEOFLEX. Nicméně od těchto zkoušek bylo po prvních dvou měřeních upuštěno z důvodu nevhodnosti

použitého materiálu, pro který nebyl nalezen adekvátní způsob měření. Hlavní příčinou byla složitost upnutí volného konce sklolaminátového svorníku do čelistí. Upnutí za totožných podmínek jako u ocelového svorníku způsobovalo drcení profilu tyče čelistmi, které by způsobilo velice nahodilé naměřené deformace na volném konci a ty by bylo následně velice obtížné eliminovat. Stav tyče po rozdrcení lze vidět na Obr. 9 (vlevo). Posléze následoval ještě pokus o zabránění rozdrcení sklolaminátové tyče použitím matice délky 100 mm, která by byla vystavena přímému tlaku místo použitého kompozitu. Nicméně se projevil druhý pro laboratorní techniku nebezpečnější problém. Sklolaminátové kotevní tyče mají nižší únosnost na závit, což plynulo z technických listů produktu, avšak mylně nebylo předpokládáno křehké porušení materiálu, které způsobilo mžikové uvolnění naakumulované energie. Tato energie byla přeměněna na kinetickou a dodala dostatečné zrychlení betonové části zkušebního tělesa, aby byl vzorek posunut zpět proti optoelektronickému inkrementálnímu snímači pohybu. Tento způsobený ráz a posun přesáhl měřicí rozsah čidla a měřicí hrot zarazilo i přes pojistku do těla snímače, což způsobilo poškození jeho skleněného měřicího aparátu. Stav výsledného poškození z druhého pokusu lze vidět taktéž na Obr. 9 (vpravo).



Obr. 9 Poškození sklolaminátové tyče – vlevo rozdrcení upínacími čelistmi, vpravo křehké porušení závitů

Nakonec bylo upuštěno i od zkoušek kombinace ocelový svorník – pryskyřice, protože společné použití těchto dvou materiálů nebývá v praxi příliš časté.

6 Vyhodnocení experimentálních zkoušek

Jako první byl vyhodnocen vliv výšky betonových těles na výsledná maximální zatížení. V kapitole *Analýza činnosti tmelených svorníků* je uveden vztah, který určuje závislost délky ukotvení jako lineární a naměřené hodnoty tomuto faktu odpovídají a to i v závislosti na druhu porušení (více Graf 2 a Graf 4). Měření probíhalo celkově ve dvou skupinách a to pro kombinace malty s příměsí popílku – svorník CKT a EKOMENT RT – svorník CKT.

Nejprve proběhlo měření a vyhodnocení výsledků na skupině vzorků s kombinací materiálů malty s příměsí popílku a ocelový svorník. Naměřené maximální síly nutné k vytržení svorníkové tyče byly podle očekávání velice nízké (maximální naměřená síla pro betonové těleso výšky 45 cm činila cca 40 kN) a umožnili opětovné použití jak válců, tak ocelových svorníků, které nejevili žádné známky poškození. Nejslabším článkem této soustavy byla použitá malta s příměsí popílku, která byla porušena ve všech případech na kontaktu svorník – tmel. Takovéto porušení se dá nazvat jako porušení soudržnosti a je funkcí smykových vlastností použitého tmele, přičemž smyková soudržnost je dána dvěma faktory, soudržností směsi a soudržností mezi povrchem tmele a svorníku. Vzhledem k vlastnostem malty s příměsí popílku, silně se drolila a šlo jí rýpat pouhým nehtem, lze předpokládat, že soudržnost byla dána jen pevnostními vlastnostmi směsi a jejím vyplněním mezi žebry závitů svorníkové tyče. Výsledné porušení lze pozorovat na Obr. 10.

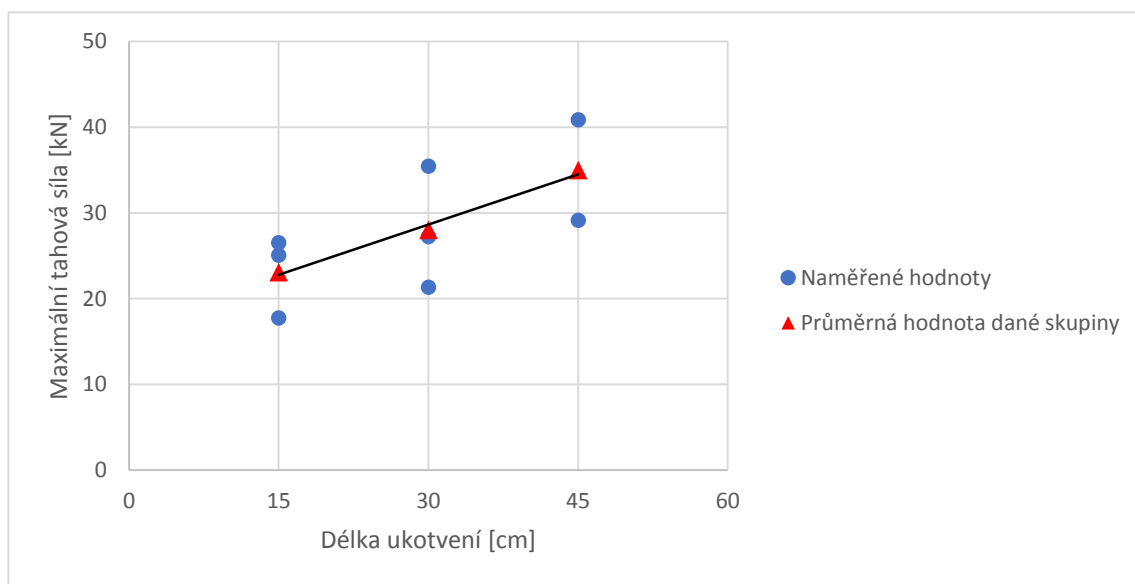


Obr. 10 Porušení soudržnosti: ocelový svorník - malta s příměsí popílku

Porušení na rozhraní svorník - tmel předurčuje takovouto směs jako nepraktickou pro praxi, protože plně využívá pevnostní charakteristiky pouze jedné složky svorníkového vyztužování a minimálně využívá pevnostních charakteristik okolního prostředí, v důsledku toho je směs značně neefektivní a neekonomická.

Graf 2 pak ukazuje lineární závislost maximálního vyvozeného tahového zatížení na délce ukotvené části svorníku (respektive výšce betonového tělesa činící 15 cm, 30 cm a

45 cm). Jelikož je znám vztah pro výpočet maximální síly vytržení pro tento druh porušení a jsou známy všechny jeho parametry (síla, průměr svorníkové tyče, délka ukotvení), jde zpětně vypočítat smykovou soudržnost pro maltu s příměsí popílku pro tento typ kotvení na základě vztahu $F = \pi \cdot d \cdot L \cdot \tau$ [1], zmíněného v kapitole 3, přičemž tento vztah však předpokládá při nulové kotevní délce nulovou mezní sílu a jak je patrné z grafu 2, tento předpoklad není splněn. Pro hypotetické menší kotevní délky nebude tedy závislost lineární a lze ji pravděpodobně lineárně aproximovat až od určité délky kotvení. Hodnoty naměřených maximálních smykových napětí jsou porovnány i s hodnotami z další série měření níže v textu v Tab. 4.

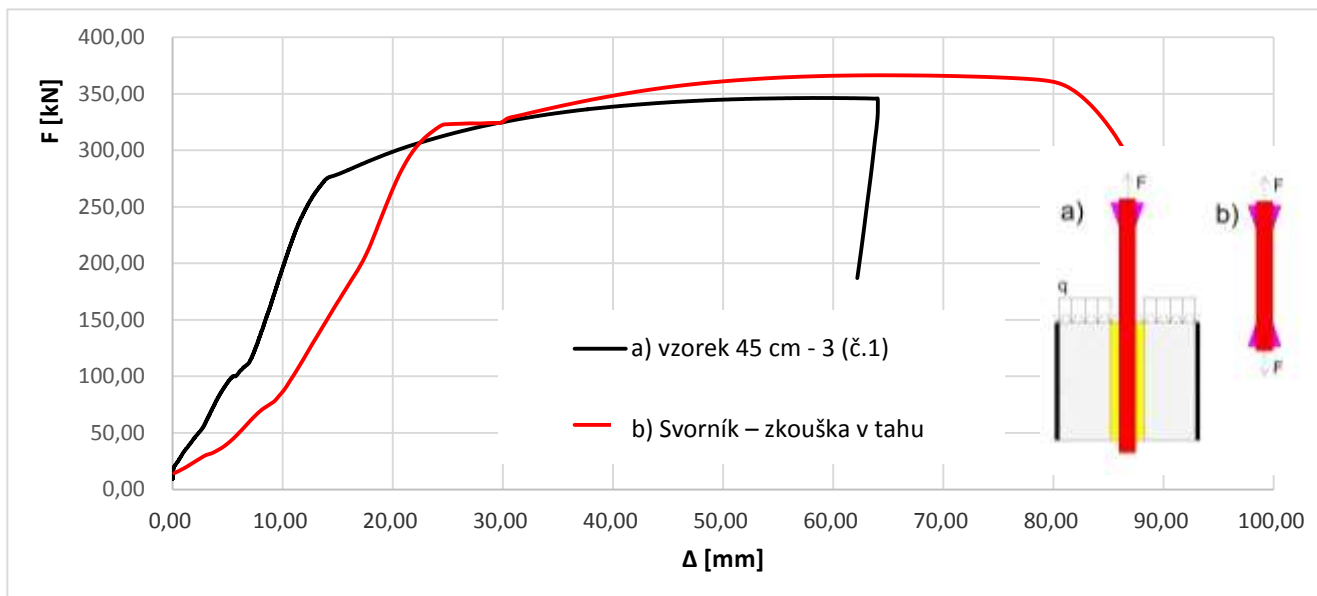


Graf 2 Závislost mezní síly na délce ukotvení pro maltu s příměsí popílku

Dále pak v tentýž grafu (Graf 2) lze vidět značné rozdíly v naměřených hodnotách v rámci totožných délek kotvení. Tento rozptyl výsledků může být způsoben segregací jednotlivých složek směsi malty s příměsí popílku během jejího plnění do vývrtu ve fázi přípravy vzorků. Směs nebyla totiž volena na základě vhodnosti pro svorníkování, ale výhradně jen dle nízké pevnostní charakteristiky.

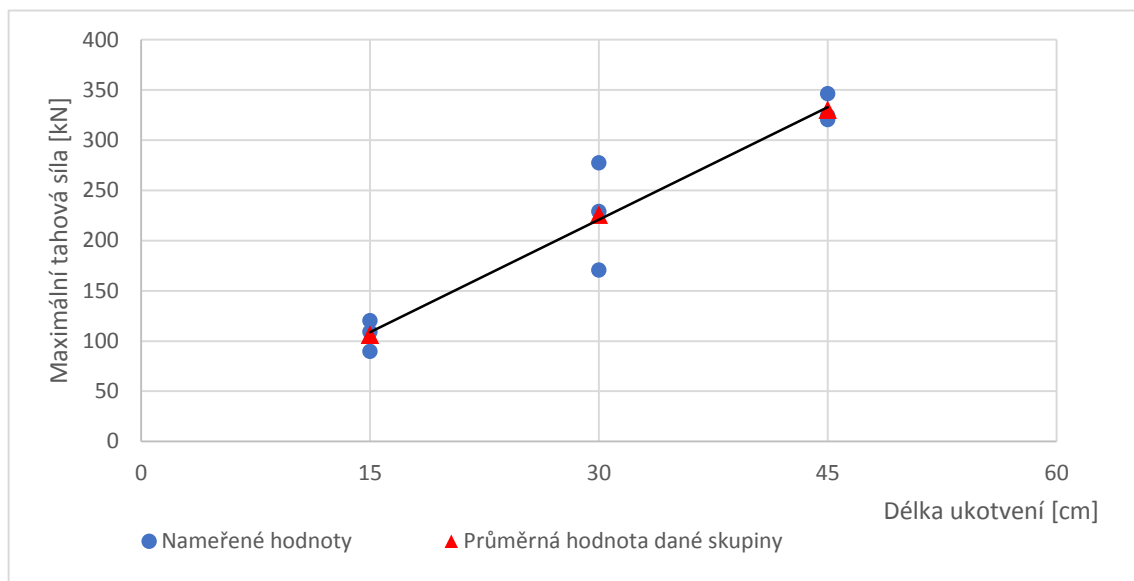
Druhé měření a vyhodnocení získaných dat proběhlo na skupině vzorků lepenými cementovou směsí EKOMENT RT. Tato směs se projevila jako velice pevná a pravděpodobně by za obdobných laboratorních podmínek, ale pro betonové tělesa výšky 60 cm, už docházelo pouze k vyčerpání únosnosti a přetržení ocelové svorníkové tyče. Smluvní únosnost použitého materiálu (tyče CKT průměru 25 mm, ocel S670H) je dle technického listu na mezi kluzu 330 kN a na mezi pevnosti 390 kN. Dosažená maximální síla 346,25 kN na vzorku kotveného po délce 45 cm už byla za mezí kluzu a při této síle už hrozilo i riziko přetržení těla svorníku. Při větších délkách kotvení by se zkouška spíše podobala testování pevnostních charakteristik

oceli než soustavy tmel - svorník - betonové těleso. Porovnáním tohoto vzorku a pevnostních charakteristik testovaného svorníku je vystiženo v grafu 3, přičemž volná délka vzorku činila 310 mm (vzdálenost od betonového tělesa k upnutí na lise) a délka mezi čelistmi tažené části svorníku během zkoušky byla 385 mm. Deformované délky svorníků nebyly tedy totožné, ale pro porovnání chování dostatečně blízké. Takto také došlo k ověření, že největší deformace probíhají na volných koncích testovaných vzorků a za obdobných podmínek jako při zkouškách na tah ocelových prutů (tento jev bude popsán později).



Graf 3 Pracovně deformační křivka svorníku a testovaného vzorku

I přes hrozící riziko přetržení svorníku a trochu odlišné chování pro betonové válce délky 45 cm (z důvodů překročení meze kluzu) byla zjištěna obdobná lineární závislost na délce kotvení jako u předchozí směsi, s tím že hlavní rozdíly spočívaly ve vyšší pevnosti použitého tmele a v průběhu zatěžování docházelo k jinému typu poruch, které ukončily měření. Graf 4 tuto závislost mezní síly na délce kotvení ukazuje blíže a na Obr. 11-A je znázorněn způsob porušení této skupiny vzorků, kdy dochází k vyjetí svorníkové tyče i s použitým tmelem na rozhraní tmel – betonové těleso. Tento druh poruchy podporuje Obr. 11-B, kde jde spatřit relativní celistvost tmele i po následném rozbití betonového tělesa (tímto krokem je ověřena i výsledná homogenita zatuhlé použité směsi). Avšak většina betonových těles této testované skupiny výšky 30 cm a 45 cm nevydržela výsledné mezní namáhání a po provedení zkoušek vykazovala menší či větší známky radiálních trhlin po výšce betonových těles. Příklad takovéto trhliny je vidět na Obr. 12. Radiální trhliny dále umožňují rozvinutí přirozené diskontinuity na rozhraní tmel – betonové těleso a následné vysunutí mezikruží tmele i se samotným svorníkem.



Graf 4 Závislost mezní síly na délce ukotvení pro směs EKOMENT RT



Obr. 11 Prstenec tmele ve vývrtu po provedené zkoušce



Obr. 12 Radiální trhlina na betonovém zkušebním tělese

Jak už bylo řečeno, i druhá skupina vzorků vykazuje lineární závislost mezní síly na délce kotvení a v rámci odchylky plně koresponduje se vztahem $F = \pi \cdot D \cdot L \cdot \tau$ [2] (především pak s kotevní délkou L) a po vyjádření smykové pevnosti ji lze stanovit následovně (uvedené hodnoty platí pro vzorek délky 30 cm a průměrnou mezní sílu 225,70 kN):

$$\tau = F / (\pi \cdot D \cdot L) = 225,70 / (\pi \cdot 0,035 \cdot 0,3) = 6842,14 \text{ kPa} \approx 6,84 \text{ MPa}$$

Další hodnoty výsledných smykových pevností pro zbylé vzorky lze vidět i s výsledky z předchozí zkoušky malty s příměsí popílku v Tab. 4.

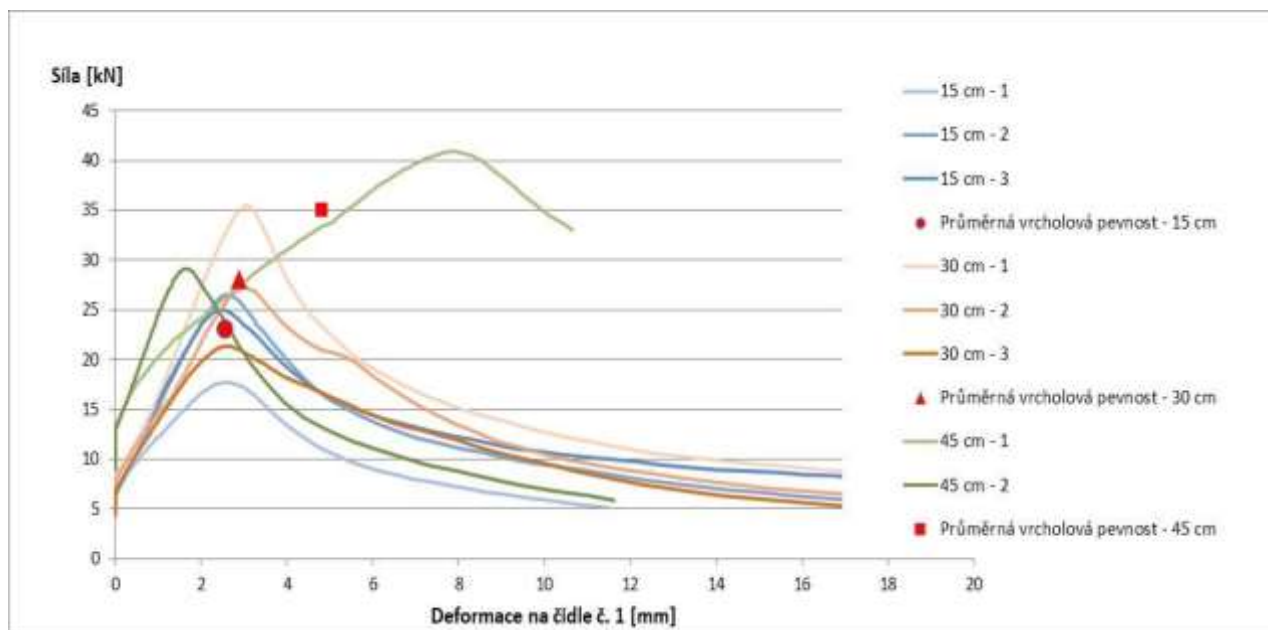
Tab. 4 Výpočet pevnostních parametrů použitých tmelů

| Délka ukotvení [cm] | Smykové napětí τ [MPa] | | | | | | | |
|---------------------------|------------------------------------|------|------|--------|------------------------------------|------|------|--------|
| | Malta s příměsí popílku | | | | EKOMENT RT | | | |
| | $\tau = F / (\pi \cdot d \cdot L)$ | | | | $\tau = F / (\pi \cdot D \cdot L)$ | | | |
| | 1 | 2 | 3 | průměr | 1 | 2 | 3 | průměr |
| 15 | 1,50 | 2,25 | 2,13 | 1,96 | 6,62 | 7,29 | 5,43 | 6,45 |
| 30 | 1,50 | 1,16 | 0,90 | 1,19 | 5,17 | 8,41 | 6,94 | 6,84 |
| 45 | 1,16 | 0,82 | - | 0,99 | 6,48 | 6,55 | 7,00 | 6,68 |

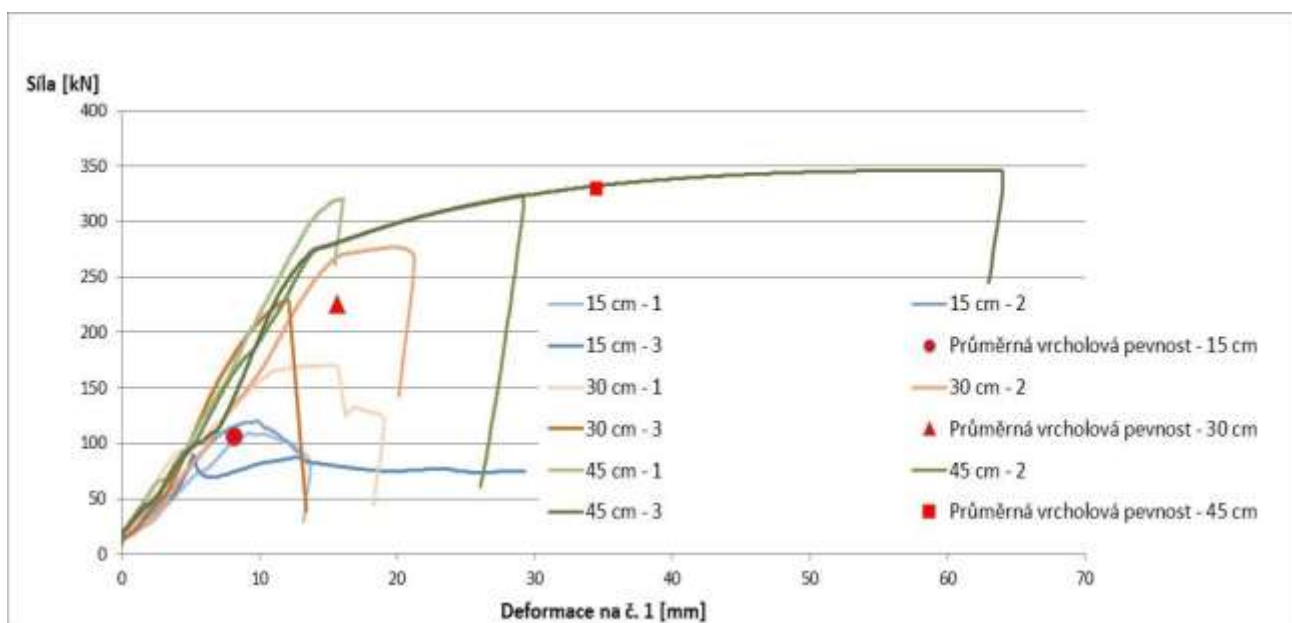
Poznámka: průměry jsou pro vzorky různé z důvodů odlišného porušení

Znalost takového údaje nám však umožňuje jen stanovit maximální možné zatížení svorníku při konkrétně volené kotevní délce a neumožňuje stanovit průběžné chování celého systému, proto byl zaznamenáván průběh zatěžující síly v závislosti na deformaci a to i po překročení mezní síly porušení. Průběh závislosti síly na deformaci je graficky zaznamenán v grafu 5 a 6 (záznam z čidla č. 1). Na těchto průbězích lze zřetelně vidět jak maximální sílu jednotlivých měření, tak například zbytkovou reziduální pevnost, zejména pro vzorky kotvené v maltě s příměsí popílku. Vývoj této zbytkové pevnosti byl patrně umožněn díky celistvosti betonových těles a neporušením svorníkové tyče během provádění zkoušek. Pro druhou sérii vzorků (tmel EKOMENT RT) tato zbytková pevnost nevznikala (jen pro kotevní délky 15 cm), patrně z důvodů právě porušení betonových těles. V grafu 6 je vidět zmíněné porušení skokovým snížením síly u vzorků délky 30 cm a 45 cm. Jev lze odůvodnit podstatně bližší pevnostní v tlaku směsi EKOMENT RT (57,38 MPa) a betonových těles (72,4 MPa), než pro případ malty s příměsí popílku (1,05 MPa). Takovéto bližší charakteristiky budou způsobovat efektivnější roznos vznikajícího napětí dále do betonového tělesa, ve kterém byl svorník

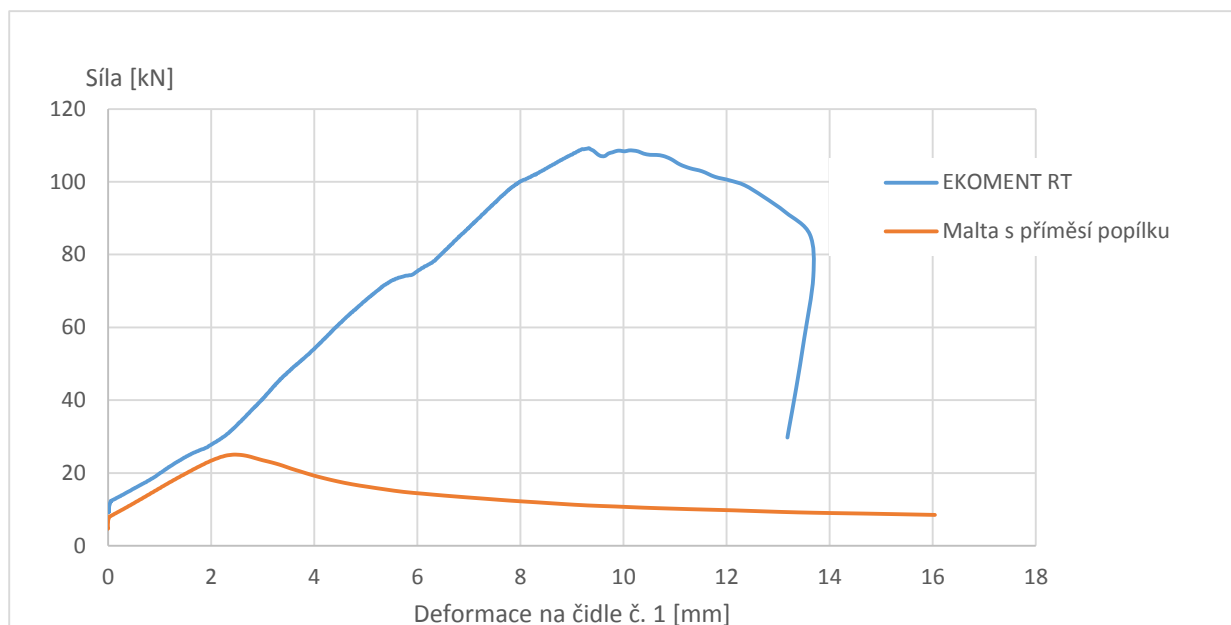
zabudován. Na posledním grafu 7 lze pak porovnat chování dvou vybraných vzorů s kotevní délkou 15 cm a oběma testovanými materiály, kde lze vidět odlišnost chování po překročení maximální mezní síly.



Graf 5 Deformační charakteristika: ocelový svorník – malta s příměsí popílku (výstup na čidle č. 1)



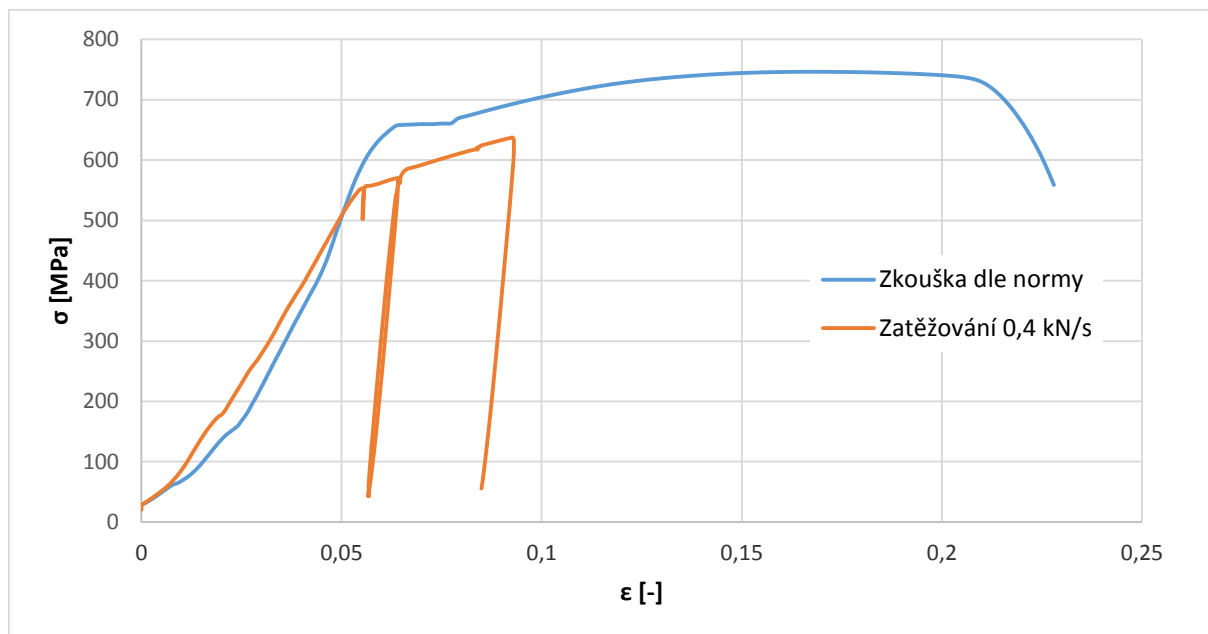
Graf 6 Deformační charakteristika: ocelový svorník – EKOMENT RT (výstup na čidle č. 1)



Graf 7 Porovnání deformační charakteristiky malty s příměsí popílku a směsi EKOMENT RT

6.1 Vyhodnocení vybrané tahové zkoušky CKT svorníku

Jak už bylo zmíněno v kapitole 3. Analýza činnosti tmelených svorníků v části věnované tahové zkoušce, je velice důležité znát deformace na volné délce svorníku. Pro tuto část svorníku by měly být nejdůležitější pouze dvě kritéria a to průřezová plocha a použitý materiál, od kterého se odvíjí Youngův modul pružnosti. Obě informace byly pro použitý typ svorníku známy, nicméně tyto parametry jsou stanoveny pro ideální stav, z těchto důvodů bylo zvoleno odzkoušení svorníku v tahu laboratorně. Byly provedeny celkem dvě zkoušky, první na základě normy *ČSN EN ISO 6892-1:2009 kovové materiály – zkoušení tahem* a druhá za obdobných podmínek jako při zkouškách pro experimentální stanovení únosnosti tmelených svorníků. Přičemž k druhé zkoušce svorníku v tahu bylo přistoupeno na základě zjištění silného ovlivnění naměřených dat způsobem upnutí. Záznam z obou zkoušek můžeme vidět v grafu 8. Krom změny rychlosti zatěžování spočíval hlavní rozdíl zkoušek v zastavení měření v průběhu zatěžování a jeho následném odlehčení a opětovném zatížení svorníku. V záznamu je tento krok zřetelný v podobě vzniklého zubu. Svorník se při tomto odlehčení nedostal zpět do své původní délky, což nebylo způsobeno překročením meze pružnosti, ale hlavně deformací a zaklesnutím zubů v čelistech upínací hlavy. Výsledné otisky čelistí lze vidět na Obr. 13. Takže výsledné deformace na čidle č. 1 během zkoušek na stanovení deformačních charakteristik tmelených svorníků nebyly ovlivněny jen protažením volné části svorníkové tyče, nýbrž i samotným upnutím tyče, což nebylo předpokládáno.

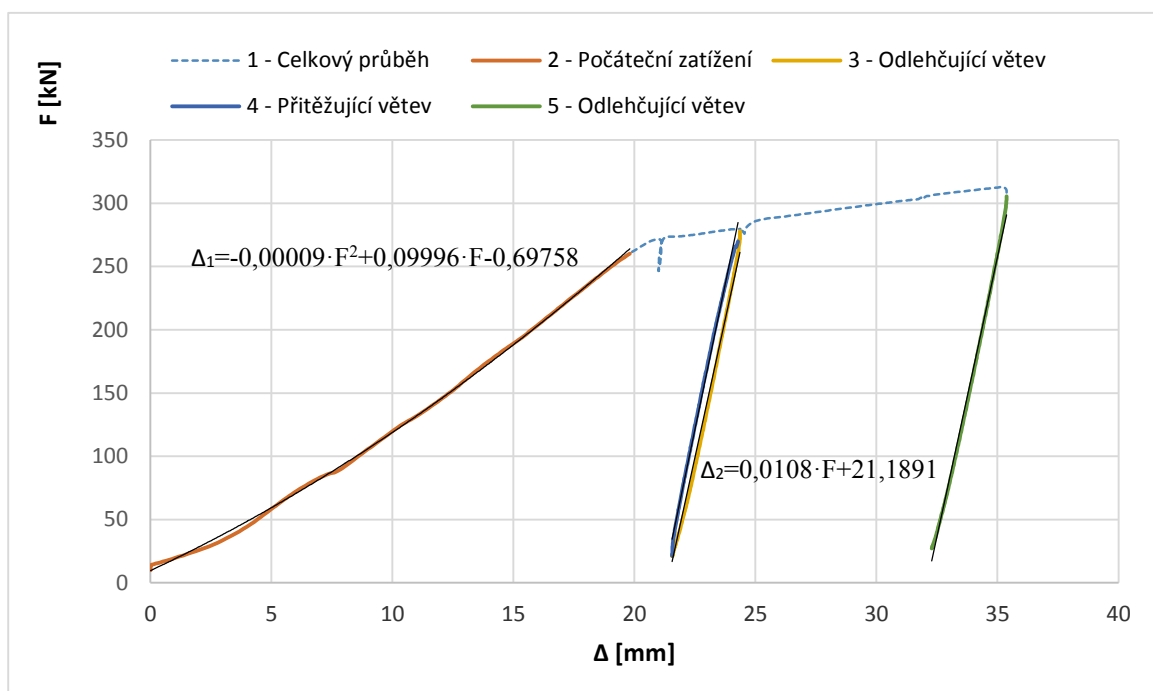


Graf 8 Deformační charakteristika svorníku CKT průměru 25 mm

Deformace na volném konci se tedy dají rozdělit do dvou skupin, první lineárně závislou na délce volného konce kotveného svorníku a druhou konstantní odvíjející se od upnutí. Nadále tedy nebylo přímo pracováno s informacemi o profilu svorníku a použitého materiálu, ale pouze s výstupem z tahových zkoušek, které tyto informace zaštiťují. Díky tomuto zjištění musel být brát v potaz i rozdílný druh upnutí během stanovování deformačních charakteristik tmeleného svorníku. Při tomto měření byl svorník upnut v čelistech jen na jednom konci, kdežto během tahové zkoušky byl upnut oboustranně, díky čemuž byla tato zkouška zatížena dvakrát toutéž chybou. Aby bylo možné zjistit deformace na čelistech, bylo přistoupeno k rozdělení grafu deformační charakteristiky svorníku z druhé zkoušky do pěti částí (Graf 9) a dvě nejdůležitější aproximovány (v závislosti na síle). První je zastoupeno počátečním zatížením a deformace probíhají na všech částech svorníku (upnutí i volné délce), v případě druhé se jedná o opětovnou přitěžující větev (Graf 9 část 4), kdy se předpokládá, že probíhají jen pružné deformace na těle svorníku a všechny nevratné deformace již proběhly v upínajících čelistech.

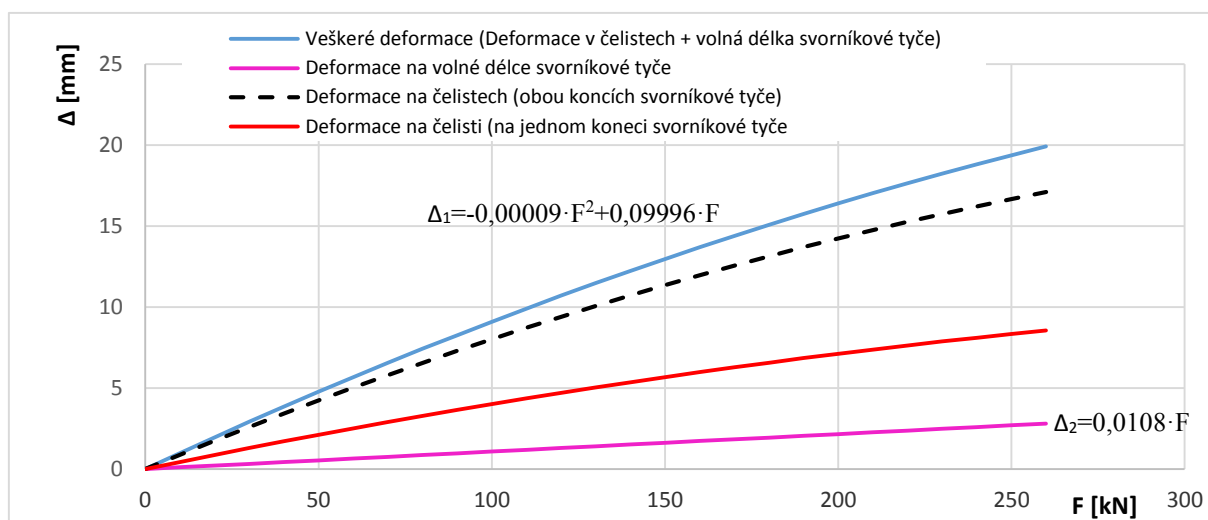


Obr. 13 Otisk čelistí upínací hlavy na svorníkové tyči po zkoušce v tahu



Graf 9 Deformační charakteristika svorníku a její rozdělení s případnými aproximacemi

Z důvodů použité techniky probíhal záznam deformace až od zatížení cca 5 kN, pro další práci byla tato počáteční hodnota zanedbána a první aproximace byla vhodně posunuta tak, aby funkce protínala souřadnici 0,0. Pro aproximaci z druhé přítěžující větve není důležitá ani tak hodnota posunu přímky, jakožto směrnice lineární funkce, a proto byla aproximace upravena tak, že neobsahuje při dalším použití hodnotu posunu. Výsledné průběhy funkcí jsou znázorněny v grafu 10 jako závislosti na síle (případ pro celý svorník s upnutím a pro volnou délku svorníku). Odečtením těchto dvou deformací vzniká deformační charakteristika v závislosti na síle pouze pro deformace na čelistech (na obou koncích svorníkové tyče), když se tento průběh podělí dvěma, měla by teoreticky vzniknout závislost pouze pro deformaci na jedné straně upnutí, přičemž chyba měření se tímto krokem také zmenší o polovinu. Testovaný svorník v této zkoušce měl volnou délku 380 mm, pro všechny zkoušky experimentálního stanovení únosnosti lepených svorníků byla volná délka 310 mm a byla dána minimální vzdáleností upínacích hlav. Proto bylo nutné přepočítat změnu délky z průběhu tahové zkoušky svorníku na volnou délku příslušící zkouškám únosnosti lepených svorníků, k čemuž stačí jen využití přímé úměry.



Graf 10 Deformační charakteristika různých částí svorníkové tyče

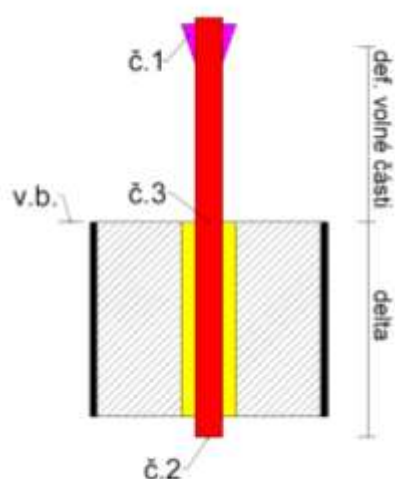
Po vhodné úpravě již zjištěných aproximací dochází k přizpůsobení tahové zkoušky svorníku podmínkám experimentálních zkoušek pro stanovení pevnosti tmelených svorníků a lze vyjádřit chování upnutého volného konce ocelové CKT tyče průměru 25 mm a oceli S670H tímto vztahem:

$$\Delta = 0,5 \cdot (\Delta_1 - \Delta_2) + 0,5 \cdot \Delta_2 \cdot l_{z1} / l_{z2} = 0,5 \cdot [(-0,00009 \cdot F^2 + 0,09996 \cdot F) - 0,0108 \cdot F] + 0,0108 \cdot F \cdot l_{z1} / l_{z2} \quad [4]$$

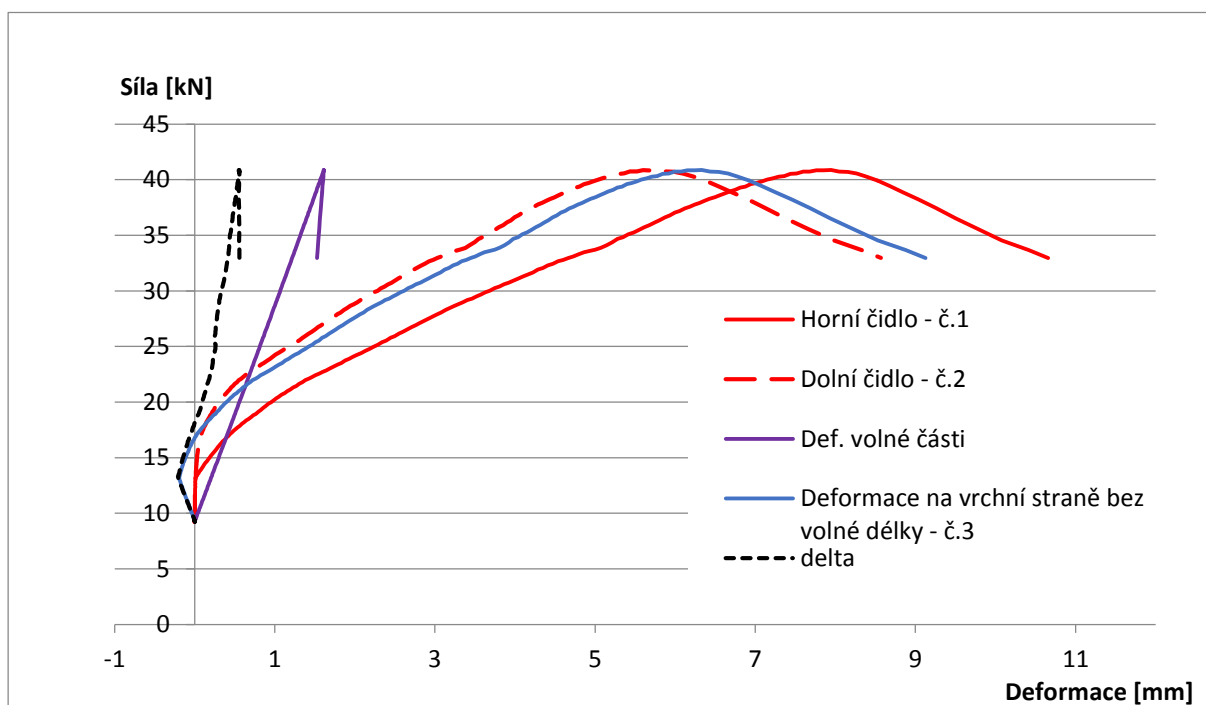
kde přebytečná deformace volného konce Δ (respektive posunu čidla č. 1) je závislá na tahové síle F a je odvozena od celkové deformace tyče Δ_1 z tahové zkoušky svorníku a deformace pouze volné délky Δ_2 . První část vzorce $0,5 \cdot (\Delta_1 - \Delta_2)$ je vlastně předpis udávající deformaci způsobenou semknutím čelistí upínací hlavy a druhý člen daného vztahu $0,5 \cdot \Delta_2 \cdot l_{z1} / l_{z2}$ vyjadřuje protažení volné délky svorníku, přičemž toto protažení udává poměr mezi vzdáleností upínacích hlav l_{z2} během tahové zkoušky svorníkové tyče a obdobné vzdálenosti l_{z1} u zkoušky, které se primárně věnuje tato práce. Hodnota l_{z2} je závazná pro použitou aproximaci, činí 380 mm a plyne z uskutečněné zkoušky na svorníku.

Výsledný vztah [4] bohužel vychází z neověřeného předpokladu trvalé deformace na upnutí v čelistech a pružné deformace na těle svorníku po volné délce. Toto tvrzení částečně podporuje Graf 9, kde při druhé fázi zatěžování tyče se křivka dostává do obdobné polohy, než bylo přikročeno k odlehčení. Dále je tento vztah platný jen při kontinuálním navyšování síly, dojde-li k poklesu zatížení, svorník již byl vystaven trvalým deformacím v čelistech lisu a bude se vracet do původního stavu jen na základě pružné deformace na těle svorníku.

Na základě výše zjištěných údajů mohl být sestaven graf porovnávající všechny naměřené údaje během zatěžování zkušebních vzorků a dále bylo možné tyto data zpracovat. Na Obr. 14 je opět k zhlédnutí umístění dvou hlavních měřicích čidel snímajících deformace a rozdělení vzorku na dvě samostatně deformované části (první definovaná volná délka svorníku a druhá znázorňuje ukotvení v betonovém tělese). Toto schéma je důležité pro Graf 11, který již výsledné naměřené posuny a deformace zobrazuje na vybraném vzorku délky 45 cm a ocelového svorníku kotveného maltou s příměsí popílku.

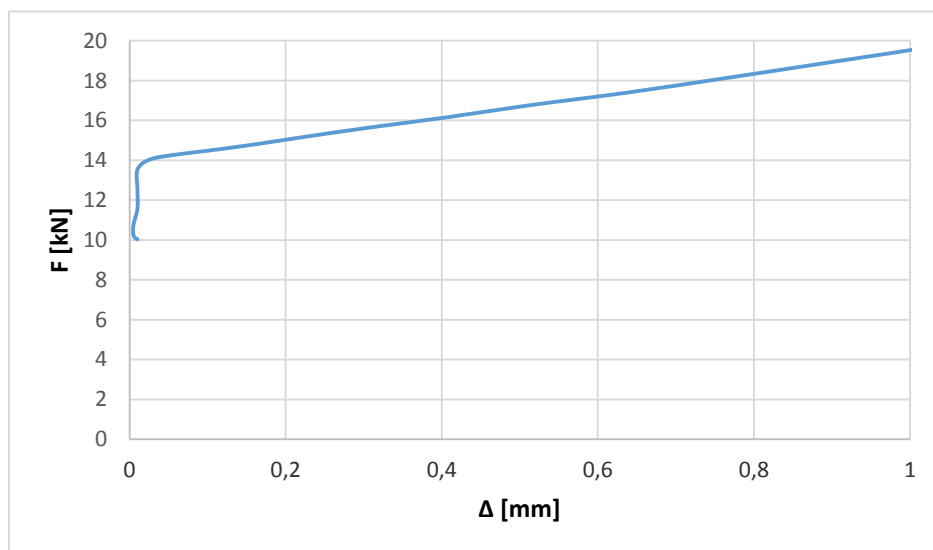


Obr. 14 Schéma rozvržení snímacích čidel a deformovaných délek



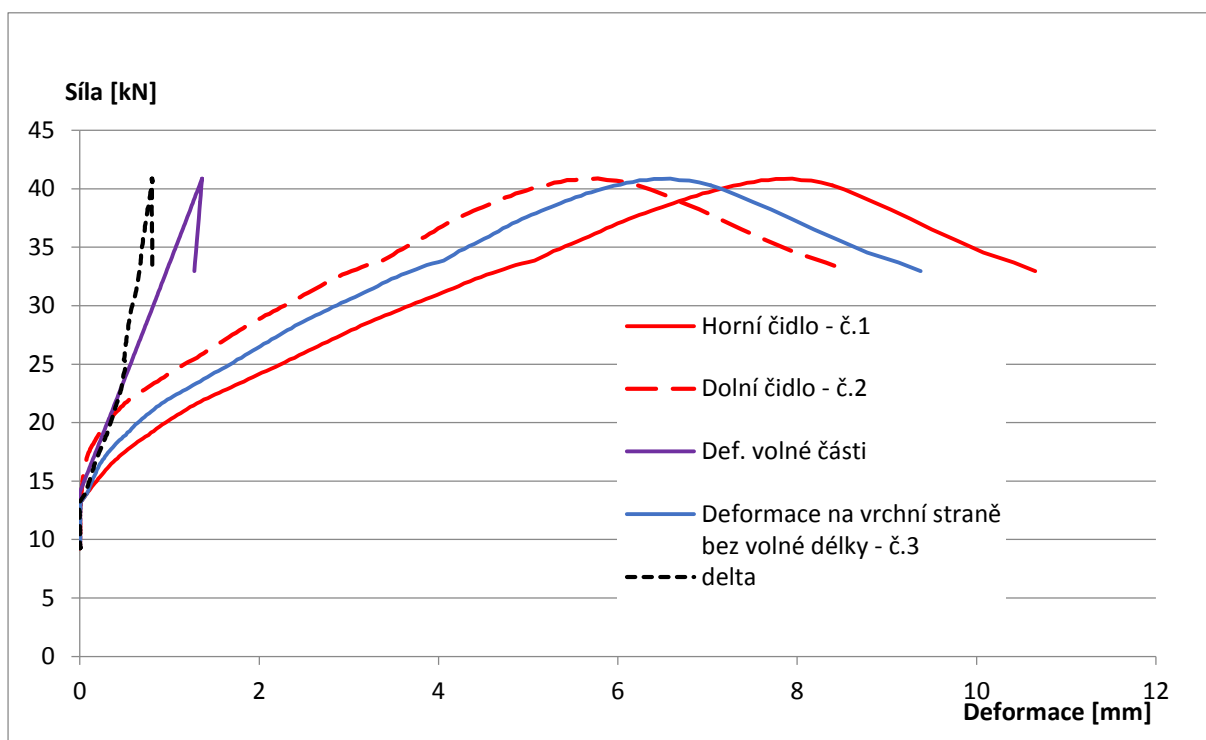
Graf 11 Deformační charakteristika jednotlivých částí tmeleného svorníku na vybraném vzorku (malta s příměsí popílku, betonové těleso výšky 45 cm a svorník CKT průměr 25 mm)

V grafu 11 můžeme vidět podobné záznamy pro čidlo č. 1 a č. 2 s tím, že pro snímač polohy umístěný ve spodní části svorníkové tyče reaguje na zatížení s mírným odstupem, což je způsobeno dvěma faktory, protažením svorníkové tyče ve volné části a současně opožděným rozvojem vznikajících deformací v hlubších částech ukotvení. Dále obsahuje deformační charakteristiku volné části svorníku, která slouží k odečtení těchto nechtěných posunů pro stanovení charakteristiky tmele. Tato deformační charakteristika volného konce svorníku musí mít své maximum pro totožnou sílu jako ostatní křivky v grafu, při následném snížení se pak mění její chování a je uvažováno pouze pružné přetvoření volné délky svorníku s ponechanými deformacemi vzniklých v čelistech. Po tomto grafickém zpracování dat bylo zjištěno, že volný konec se deformoval neadekvátně vůči naměřeným posunům na čidle č. 1, což zdůrazňuje křivka posunů svorníku na úrovni vztažného bodu (č. 3). Výsledný pohyb svorníku na této úrovni by byl zpočátku záporný, z čehož by plynulo, že svorník se v této části pohyboval proti směru zatěžování zkoušky do betonového tělesa. Při zpětném bližším prozkoumání počátečního zatížení ze zkoušky svorníku v tahu vyšlo najevo, že svorník se začal deformovat až od zatížení cca 14 kN (můžeme vidět v grafu 12, kde je znázorněna počáteční fáze tahové zkoušky svorníkové tyče CKT v lépe rozlišitelném měřítku). Tento opožděný rozvoj deformace mohl být způsoben systematickou chybou měření na zařízení lisu a musel být brán dodatečně v potaz.



Graf 12 Deformační charakteristika svorníku CKT průměru 25 m – počáteční fáze

Z tohoto důvodu byla učiněna změna křivky deformační charakteristiky svorníkové tyče CKT. Bylo uvažováno, že její deformace je do síly 14 kN nulová a až po dosažení této síly se začne deformovat na základě předchozích zjištěných údajů. Posléze došlo opětovně ke zpracování dat posunů a deformací na tentýž vzorku (ocelový svorník, malta s příměsí popílku, betonové těleso výšky 45 cm), výsledné průběhy jsou znázorněny v grafu 13.

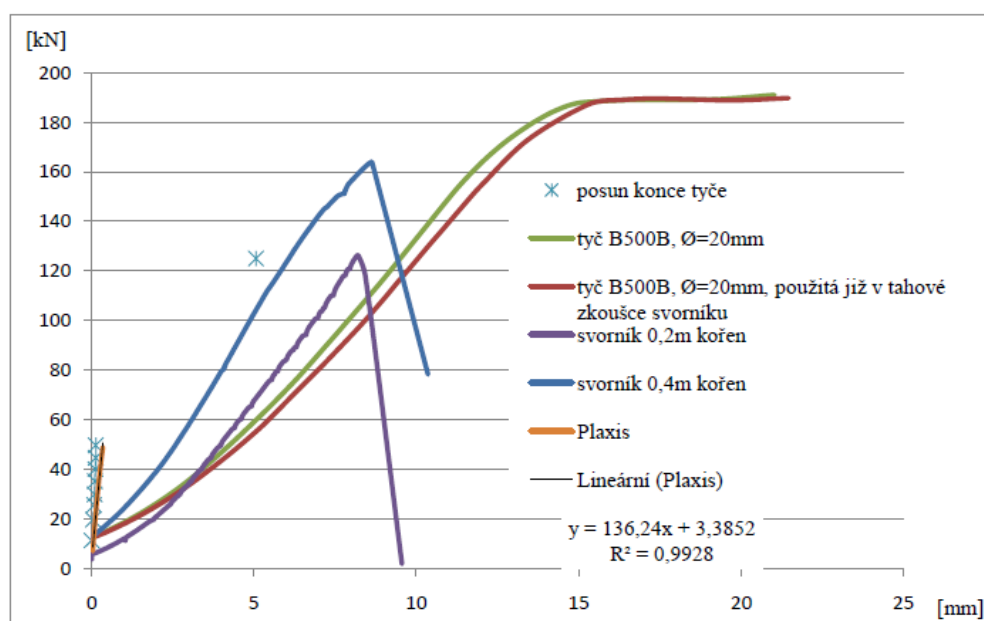


Graf 13 Deformační charakteristika jednotlivých částí tmeleného svorníku na vybraném vzorku po opravě (malta s příměsí popílku, betonové těleso výšky 45 cm a svorník CKT průměr 25 mm)

Posledním zpracovaným výstupem měření experimentální části je Graf 13, kde hlavní informací je pracovní-deformační charakteristika zatmelené části svorníkové tyče (v grafu znázorněna pod křivkou *delta*), již po všech úpravách a separaci přebytečných naměřených dat. Z této charakteristiky je patrné, že zpočátku se svorník protahuje lineárně závisle na zatěžující síle. I přes to, že charakteristika se jeví v počáteční fázi stejná jako deformace na volném konci svorníkové tyče, ve skutečnosti tomu tak není, podobnost je čistě náhodná. Musí být brány v potaz hlavní rozdíly jako délka (volný konec 380 mm, kotevní délka svorníku 450 mm) a způsob upnutí. S následným zvyšujícím se zatížením postupně zpomaluje protažení upnuté části svorníku a po dosažení maximálního mezního zatížení se dále nemění i při snižujících se hodnotách působící síly. Patrně dochází i k postupnému rozvolňování prstence materiálu upínající svorníkovou tyč, bohužel z grafu nelze přesně popsat, jak tento proces probíhá a funguje. Pro následnou interpretaci zjištěných hodnot z tohoto pohledu by bylo vhodné využití analytických nástrojů v podobě diferenciálních rovnic pracujících s postupující rozdílnou změnou protažení kotvené části tyče a jejím současným posunem, přičemž tyto procesy budou spolu značně provázané. Tyto postupy však přesahují rámec znalostí obsažený v této diplomové práci.

6.2 Porovnání s obdobnou analýzou

Tato práce částečně navazuje na diplomovou práci *Únosnost tmelených horninových svorníků* [XI], v které byly vyhodnocovány taktéž zkoušky posuzujících činnost tmelené svorníkové výztuže a v které byly i vytvořeny matematické modely pro stanovení chování této výztuže. Provedené zkoušky byly však provedeny v menším rozsahu a to jak kvantitativně tak kvalitativně. Laboratorní zkoušení probíhalo na dvou vzorcích s kotevní délkou 20 cm a 40 cm a záznam deformací probíhal pouze na jediném snímači, obdobném jako čidlo č. 1 v případě zkoušek této práce. Pevnost použitého tmele v rámci cizích zkoušek byla obdobná (51, MPa), pevnost betonové směsi těles využitých pro toto měření byla podstatně nižší (25 MPa) a různá byla i geometrie použitých vzorků (betonové těleso čtvercového profilu 150 mm x 150 mm, s vývrtem průměru 35 mm osazené ocelovou žebříkovou tyčí R, průměru 20 mm a třídy oceli B500B). Záznam z těchto zkoušek i s hodnotami z matematických modelů můžeme vidět na převzatém grafu 14 [XI].



Graf 14 Převzaté pracovní deformace charakteristiky [XI]

V grafu 14 lze vidět obdobné výsledky pro laboratorní zkoušky (nižší deformace na zkušebních tělesech oproti deformacím v tahových zkouškách na ocelových tyčích, razantní úbytek zatěžující síly v průběhu zkoušek způsobený taktéž porušením betonového tělesa), přičemž nejzajímavějším poznatkem z tohoto zdroje je podstatně vyšší tuhost matematických modelů oproti laboratorním zkouškám, která byla přisuzována geometrickým odchylkám modelů, nepřesnosti materiálových charakteristik a definicí okrajových podmínek matematického modelu. V rámci měření nebyl brán v potaz vliv upnutí ocelové tyče v čelistech a příslušných deformace charakteristik spoje, které značně zvyšují deformace na volném

konci svorníkové tyče. Kdyby se zmíněné deformace navíc odečetly, bylo by docíleno daleko bližších deformačních charakteristik z laboratorního měření a výsledků z matematického modelu, nicméně totožných hodnot by patrně docíleno nebylo z již zmíněných důvodů odlišností skutečných vlastností systému a těch definovaných matematickým aparátem. Do budoucna by mohlo být vhodné pokusit se vytvořit matematický model s obdobnými charakteristikami, jako byly využity v této práci, a pokusit se chování těchto modelů opět porovnat.

7 Závěr

Diplomová práce se zabývala a poukazuje na možné způsoby porušení, chování a experimentální stanovení maximální únosnosti tahem zatížených tmelených svorníků. Svorníková výztuž, jakožto výztuž provázaná charakteristikami tří základních prvků (hornina, svorníková tyč, tmel), ztrácí únosnost nerespektováním pevnostních vlastností aspoň jednoho z těchto elementů, případně je ovlivněna soudržností na jejich stycích. Samostatné vlastnosti využitých materiálů jako tmel a svorníková tyč jsou přitom v dnešní době lehce laboratorně ověřitelné na základě norem a normových postupů a bývají uvedeny v technických listech produktů. Vlastnosti horninového prostředí jsou více nahodilé a pro ověření chování a zjištění maximálních mezních zatížení systému hornina – výztuž se provádí zkoušky in situ.

Pro výpočet smykových parametrů na kontaktu tmel-hornina či svorník-tmel se vycházelo ze zjednodušeného předpokladu, že dochází k porušení pouze na jednom z materiálů (hornina, tmel resp. jím zprostředkovaném kontaktu), což může být v některých případech velmi nepřesné zjednodušení. O tom, který materiál se bude svými vlastnostmi převážně podílet na tvorbě poruch, rozhoduje relativní rozdíl v pevnostních charakteristikách použitých materiálů, o čemž se přesvědčila praktická část této práce z experimentálních zjištěných dat. Čím se pevnostní vlastnosti materiálů více liší, tím více se projevuje porucha na méně únosném elementu, v takovém případě ale nejsou použité materiály využity efektivně. Tento předpoklad se projevil u testovaných vzorků tmelených maltou s příměsí popílku, kde došlo k poruše na kontaktu tmel – svorník respektive k usmýknutí v hmotě tmele vyplňující žebra závitové tyče. V případě bližších parametrů použité kotvící směsi a horniny (v laboratorních zkouškách napodobující betonové těleso s vývrtem) dochází k spuštění složitějších mechanismů a porucha se rozvíjí i v mase horniny (respektive betonovém tělese). Tyto poruchy se projeví v mírném radiálním popraskání betonových těles zkušebních vzorků.

Závěrem lze zhodnotit možné změny postupů pro budoucí obdobná měření. Jako nejzásadnější může být uvedeno vyřazení nadbytečných měřených deformací na volném konci svorníkové tyče, které by mohlo být docíleno umístěním dalšího čidla snímajícího pohyb přímo na úrovni vztažného bodu, nebo velice blízko k němu. K tomuto účelu by mohla být svorníková tyč dodatečně osazena zprostředkující ploškou, na které by bylo možné snímat pohyb. Pokud by tento krok nebyl možný, bylo by vhodné provést více tahových zkoušek použitých svorníkových tyčí a zpřesnit hodnoty nadbytečných deformací vznikajících v čelistech lisu. Dále může být vhodné zjistit přesný vliv objímky upnuté kolem válců na měření, případně zjistit jestli je dodatečně zatěžována vnitřním pnutím vznikajícím ve zkušebním tělese v průběhu zkoušek.

8 Seznam grafických částí

8.1 Obrázky

| | |
|---|----|
| Obr. 1 Příklad vhodného a nevhodného zajištění profilu díla..... | 13 |
| Obr. 2 Schéma navrženého vzorku: 1- Betonové těleso; 2- Svorník; 3- Tmel; 4- Objímka... | 15 |
| Obr. 3 Schéma zatěžování a měření na vzorku: F – zatěžovací síla; q – reakce; č. 1. – čidlo 1; č. 2 – čidlo 2; v. b. – vztažný bod..... | 16 |
| Obr. 4 Formy pro betonáž zkušebních těles..... | 19 |
| Obr. 5 Vrtací technika a zkušební betonové těleso | 19 |
| Obr. 6 Schéma pro odvození nutných délek svorníku | 20 |
| Obr. 7 Porovnání schématu vzorku se skutečným stavem: 1- Betonové těleso; 2- Svorník; 3- Tmel; 4- Objímka | 23 |
| Obr. 8 Měřicí soustava a detail čidla č. 2 | 24 |
| Obr. 9 Poškození sklolaminátové tyče – vlevo rozdrčení upínacími čelistmi, vpravo křehké porušení závitu..... | 25 |
| Obr. 10 Porušení soudržnosti: ocelový svorník - malta s příměsí popílku | 26 |
| Obr. 11 Prstenec tmele ve vývrtu po provedené zkoušce..... | 29 |
| Obr. 12 Radiální trhлина na betonovém zkušebním tělese..... | 29 |
| Obr. 13 Otisk čelistí upínací hlavy na svorníkové tyči po zkoušce v tahu | 33 |
| Obr. 14 Schéma rozvržení snímacích čidel a deformovaných délek | 36 |

8.2 Grafy

| | |
|---|----|
| Graf 1 Deformační charakteristika betonu | 18 |
| Graf 2 Závislost mezní síly na délce ukotvení pro maltu s příměsí popílku | 27 |
| Graf 3 Pracovně deformační křivka svorníku a testovaného vzorku | 28 |
| Graf 4 Závislost mezní síly na délce ukotvení pro směs EKOMENT RT | 29 |
| Graf 5 Deformační charakteristika: ocelový svorník – malta s příměsí popílku (výstup na čidlo č. 1) | 31 |
| Graf 6 Deformační charakteristika: ocelový svorník – EKOMENT RT (výstup na čidlo č. 1) | 31 |
| Graf 7 Porovnání deformační charakteristiky malty s příměsí popílku a směsi EKOMENT RT | 32 |
| Graf 8 Deformační charakteristika svorníku CKT průměru 25 m | 33 |

| | |
|--|----|
| Graf 9 Deformační charakteristika svorníku a její rozdělení s případnými aproximacemi | 34 |
| Graf 10 Deformační charakteristika různých částí svorníkové tyče | 35 |
| Graf 11 Deformační charakteristika jednotlivých částí tmeleného svorníku na vybraném vzorku (malta s příměsí popílku, betonové těleso výšky 45 cm a svorník CKT průměr 25 mm) | 36 |
| Graf 12 Deformační charakteristika svorníku CKT průměru 25 m – počáteční fáze | 37 |
| Graf 13 Deformační charakteristika jednotlivých částí tmeleného svorníku na vybraném vzorku po opravě (malta s příměsí popílku, betonové těleso výšky 45 cm a svorník CKT průměr 25 mm)..... | 38 |
| Graf 14 Převzaté pracovní deformační charakteristiky | 39 |

8.3 Tabulky

| | |
|--|----|
| Tab. 1 Možné kombinace materiálů pro účely zkoušek..... | 17 |
| Tab. 2 Složení malty s příměsí popílku na cca. 1,5 l..... | 21 |
| Tab. 3 Pevnost použitých tmelů na bázi cementu po 7 dnech..... | 22 |
| Tab. 4 Výpočet pevnostních parametrů použitých tmelů..... | 30 |

9 Seznam použitých pramenů

- [I.] ČSN 72 1001 - *Pojmenování a popis hornin v inženýrské geologii*
- [II.] ČSN EN 12390-3 - *Zkoušení ztvrdlého betonu - Část 3: Pevnost v tlaku zkušebních těles*
- [III.] ČSN EN 1015-11 - *Stanovení pevnosti ztvrdlých malt v tahu za ohybu a v tlaku*
- [IV.] ČSN EN ISO 6892-1:2009 *Kovové materiály – Zkoušení tahem*
- [V.] ALDORF, Josef. *Mechanika podzemních konstrukcí*. VŠB-TU Ostrava, 1999, ISBN 80-7078-695-7
- [VI.] Minova. Minova Bohemia s.r.o.: A member of the Orica Group. [online]. 25.11.2014 [cit. 2014-11-25]. Dostupné z: <http://www.minova.cz/> Domovská stránka firmy Minova Bohemia s.r.o nabízí informace o firmě, tiskové zprávy a kontaktní údaje. K dispozici je katalog produktů s možností stažení jejich technických listů.
- [VII.] SUCHÁNEK, Jaroslav, Richard ŠŇUPÁREK a Vladimír KRČMÁŘ. *Horninové svorníky kotvené pryskyřicí: příručka firmy Minova*. Ostrava: Minova Bohemia, 92 s.
- [VIII.] HOBST, Leoš a Josef ZAJÍC. *Kotvení do hornin*. 2., dopl. vyd. Praha: SNTL - Nakladatelství technické literatury, 1975, 443 s.
- [IX.] Ústavu geotechniky Fakulty stavební Vysokého učení technického v Brně. Ústav geotechniky. [online]. 25.11.2014 [cit. 2014-11-25]. Dostupné z: http://geotech.fce.vutbr.cz/studium/mech_hornin/mhig_13.pdf Stránky nabízí studijní podklady vybraných předmětů garantovaných Ústavem geotechniky Fakulty stavební Vysokého učení technického v Brně
- [X.] Interní příručka v rámci OKD, *Svorníková výztuž – příručka*
- [XI.] HASTÍKOVÁ, A.: *Únosnost tmelených horninových svorníků*: Diplomová práce. Ostrava: VŠB-TUO, Fakulta stavební, Katedra geotechniky a podzemního stavitelství, 2013, Vedoucí práce: VOJTASÍK, K.